EL ORIGEN DE LA MENTE • VEINTICINCO AÑOS DE CIENCIA QUIMICA

INVESTIGACION y CIENCIA

NOVIEMBRE 2001
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Nanocircuitos

Nanotécnica en medicina

Nanotécnica y química

Leyes nanoescalares

Nanotécnica y robots

Nanomáquinas

NANOTECNICA

LA NUEVA INGENIERIA





Noviembre de 2001 Número 302

SECCIONES

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Felice Frankel

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
5	Juan Luis Arsuaga Ferreras e Ignacio Martínez
6-8	Cortesía de Madrid Scientific Films
9	Juan Luis Arsuaga Ferreras e Ignacio Martínez
10-11	Cortesía de Madrid Scientific Films
12	Juan Luis Arsuaga Ferreras e Ignacio Martínez
14-18	Pere Molera
31	Felice Frankel y J. Christopher Love
32	Scientific American Library ©1982 con permiso de W. H. Freeman and Company
33	Nina Finkel
35	Nanophase Technologies
36	Felice Frankel y Kateri E. Paul, cortesía de George M. Whitesides
39-44	Bryan Christie
47	M. J. Murphy, D. A. Harrington y M. L. Roukes, coloreado por Felice Frankel
49	K. C. Schwab, E. A. Henriksen y M. L. Roukes
50	B. J. Van Wees; Nina Finkel (*diagrama*)
51	Joe Munroe, cortesía de Caltech Archives
52	T. A. Fulton y G. J. Dolan; Bryan Christie (*dibujos*)
53	D. A. Harrington y M. L. Roukes
54	Felice Frankel y Yu Huang
57	Slim Films
58	Bryan Christie
60	Slim Films
62	Felice Frankel, K. F. Jensen, M. G. Bawendi, C. Murray, C. Kagan, B. Dabbousi y J. Rodriguez-Viego
65	Jeff Johson
66	Shuming Nie
69	Jeff Johnson
71	Peter Menzel
73	Pam Francis
75	Jeff Johnson
76	Baldor Electric Company; David DeRosier, ©2000 Instituto Americano de Física (*micrografía*)
78	Jeff Johnson
79	Michael S. Yamashita
80-81	James Steinberg
82-83	Juan M. R. Parrondo
84-85	Axel Weigend (*dibujos*); Born, Universität Duisburg (*fotografía*)
86-87	George Retseck
96	Johnny Johnson

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Leyes nanoescalares, Nanocircuitos* y *Aventuras problemáticas*; Juan Pedro Campos: *Nanotécnica en medicina*; J. Vilardell: *Nanotécnica y ensambladores, Nanotécnica y química, Hace...* e *Ideas aplicadas*; Juan Pedro Adrados: *Máquinas nanométricas antiguas y futuras* y *De la microtécnica a la nanotécnica*; A. Garcimartín: *Perfiles*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORIAL DIRECTOR, ON-LINE Kristin Leutwyler
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky, George Musser y Sarah Simpson
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

NIÑO POBRE, NIÑO ENFERMO. «En Gran Bretaña una encuesta sobre la salud infantil descubrió que la alta mortalidad guardaba una manifiesta relación con tres de las grandes aflicciones de los pobres: altas tasas de nacimientos prematuros, neumonía y gastroenteritis. Aunque todos los grupos socioeconómicos han mostrado descensos apreciables en la mortalidad infantil desde 1939, donde más se ha notado la mejora es en las categorías más acomodadas; así, los avances médicos de la última década han ensanchado la brecha. En todos los grupos la principal causa de muerte durante el primer mes es el nacimiento prematuro. Se sugiere que ese exceso se debe al parto en edad precoz, nacimientos poco espaciados, cuidados prenatales deficientes y exceso de trabajo durante el último mes del embarazo.»

BACTERIAS PÚRPURAS. «Estudiando las respuestas de las células a estímulos sencillos podemos aclarar el comportamiento de organismos más complejos. La bacteria púrpura *Rhodospirillum* reacciona de un modo muy claro ante la luz. Ese microorganismo, de forma de sacacorchos, puede nadar hacia adelante y hacia atrás con igual facilidad. Cuando baja la iluminación ambiente, se limita a invertir el sentido de su desplazamiento. Si todos los sistemas vivos excitables poseen un mecanismo físico común para la irritabilidad (o sea, la reacción ante un cambio en el entorno), las relaciones esenciales entre estímulo y reacción deberán ser las mismas en cada caso. Por tanto, debe ser de sumo interés comprobar si las reacciones de las bacterias púrpuras son cuantitativamente similares a las de las fibras nerviosas. —Roderick K. Clayton y Max Delbrück»

...cien años

UN HITO AERONÁUTICO, TAL VEZ. «El comité responsable del premio Deutsch decidió el 4 de noviembre concedérselo a M. Santos-Dumont por su logro del 19 de octubre: su vuelo en dirigible alrededor de la Torre Eiffel. Si bien M. Santos-Dumont ha ejecutado una proeza notable, ello no supone necesariamente que haya realizado nada de gran valor. Ha demostrado que, con un aparato muy costoso y delicado, un aeronauta experto puede, bajo condiciones favorables, elevarse desde un punto dado, dibujar un círculo y volver, sin matarse. El acontecimiento, pese a lo agradable, no señala un paso adelante hacia la consecución práctica de la navegación aérea. Probablemente la solución para el vuelo aéreo de interés comercial nunca se alcanzará hasta que se abandone la idea del globo dirigible y sea sustituida por la de un mecanismo construido sobre bases estrictamente mecánicas.»

¿PRIMER PERISCOPIO NÁUTICO? «Un ingeniero italiano, el señor Triulzi, ha concebido un instrumento especial, el 'cleptoscopio', que permite a la tripulación de un buque submarino sumergido averiguar lo que pasa en la superficie. Consta de un tubo dotado con prismas de vidrio. Se efectuaron experimentos a bordo del submarino *Il Delphino* en presencia del ministro de Marina italiano. Se obtuvieron con éxito fotografías de objetos en la superficie. [*Nota de la redacción: La invención del periscopio, en 1902, suele atribuirse a Simon Lake*.]»



Máquina de coser SINGER, 1851

...ciento cincuenta años

LA MÁQUINA DE COSER DE SINGER. «En el grabado adjunto se ilustra la máquina de coser de Isaac M. Singer, patentada el 8 de agosto pasado. Las puntadas se ejecutan mediante dos hilos, uno facilitado por una lanzadera y el otro por la aguja. Sin dos hilos, hasta ahora ninguna máquina de coser ha dado buenas puntadas. Esta máquina trabaja bien. [*Nota de la redacción: Hacia 1913 las ventas anuales de máquinas de coser Singer llegaban a 2,5 millones.*]»

REVÓLVERES COLT. «Carta a la Redacción. 'Muy señor mío: Mucho se ha dicho últimamente acerca de la pretensión del señor Colt sobre la invención de la pistola revólver; quizás arrojemos luz sobre el tema si le decimos que en el año 1822, para un caballero de nombre Collier, hicimos los cañones de 200 mosquetes y 200 pistolas basándonos precisamente en los mismos principios que los expuestos por el señor Colt. —John Evans e Hijo, Londres.' Respuesta de la Redacción: 'No es infrecuente reclamar un origen inglés para muchos inventos norteamericanos. No creemos lo anterior; sin duda, el señor Colt es un inventor original.' [*Nota de la redacción: Es probable que Samuel Colt realmente viera y copiara algunas características de la pistola de pedernal de 1818 de Elisha Collier en su pistola de 1836.*]»

El origen de la mente

Desde Darwin los evolucionistas vienen discutiendo sobre el origen de la consciencia y del lenguaje. Los huesos hioides desenterrados en el yacimiento de Atapuerca constituyen una pieza fundamental para explicar la adquisición del habla

Juan Luis Arsuaga Ferreras e Ignacio Martínez Mendizábal

Charles Darwin y Alfred Russell Wallace concibieron de forma independiente la teoría de la evolución a través de la selección natural. Ambos creyeron posible explicar el origen de las especies por medio de ese mecanismo. Pero mientras Darwin llevó la teoría hasta su última consecuencia, Wallace se detuvo a un paso del final.

La última consecuencia no era otra que el origen de las capacidades cognitivas. Para Darwin se trataba de un producto más de la selección natural, en tanto que Wallace atribuía su origen a una intervención externa, divina según parece. La mente sería para Darwin una función del cerebro, mientras que Wallace la consideraba una entidad totalmente diferente, con un substrato no material.

Pese a su adscripción evolucionista, son muchos los que siguen viendo algo especial en el origen de nuestras facultades superiores. Darwin fundaba la aparición de órganos nuevos en la lenta acumulación de muchos cambios pequeños a lo largo de dilatados períodos de tiempo. En *El origen de las especies* escribió: "La psicología se basará seguramente sobre los cimientos, bien echados ya por míster Herbert Spencer, de la necesaria adquisición gradual de cada una de las facultades y aptitudes mentales. Se proyectará mucha luz sobre el origen del hombre y sobre su historia". En cambio, los autores modernos en línea con los planteamientos de Wallace afirman que la mente humana, simbólica y consciente, se originó de modo súbito. Tan extraordinario fenómeno se habría producido cuando surgió nuestra especie, o aun después (según Richard Klein al menos 50.000 años más tarde).

Noam Chomsky, pese a defender la existencia de un "órgano para el lenguaje" en el cerebro humano, niega que ese "órgano" haya surgido por selección natural. Para Stephen Jay Gould y Ian Tattersall la mente y el lenguaje no son producto de la selección natural ordinaria, sino un efecto colateral de la evolución. El cerebro se habría desarrollado en los homínidos para cumplir misiones diferentes de las funciones que luego asumió en nuestra especie. Una explicación parecida ofrece Steven Mithen con su teoría de una inteligencia que primero es modular (o sea, compartimentada) y luego se vuelve fluida (unificada y global) en el *Homo sapiens* moderno.

Otros autores, así Lewis Bidford o Clive Gamble, no conceden a las especies fósiles diferentes de la nuestra (los neandertales, por ejemplo) la capacidad de manejar símbolos, ni siquiera la de planificar el futuro a medio plazo.

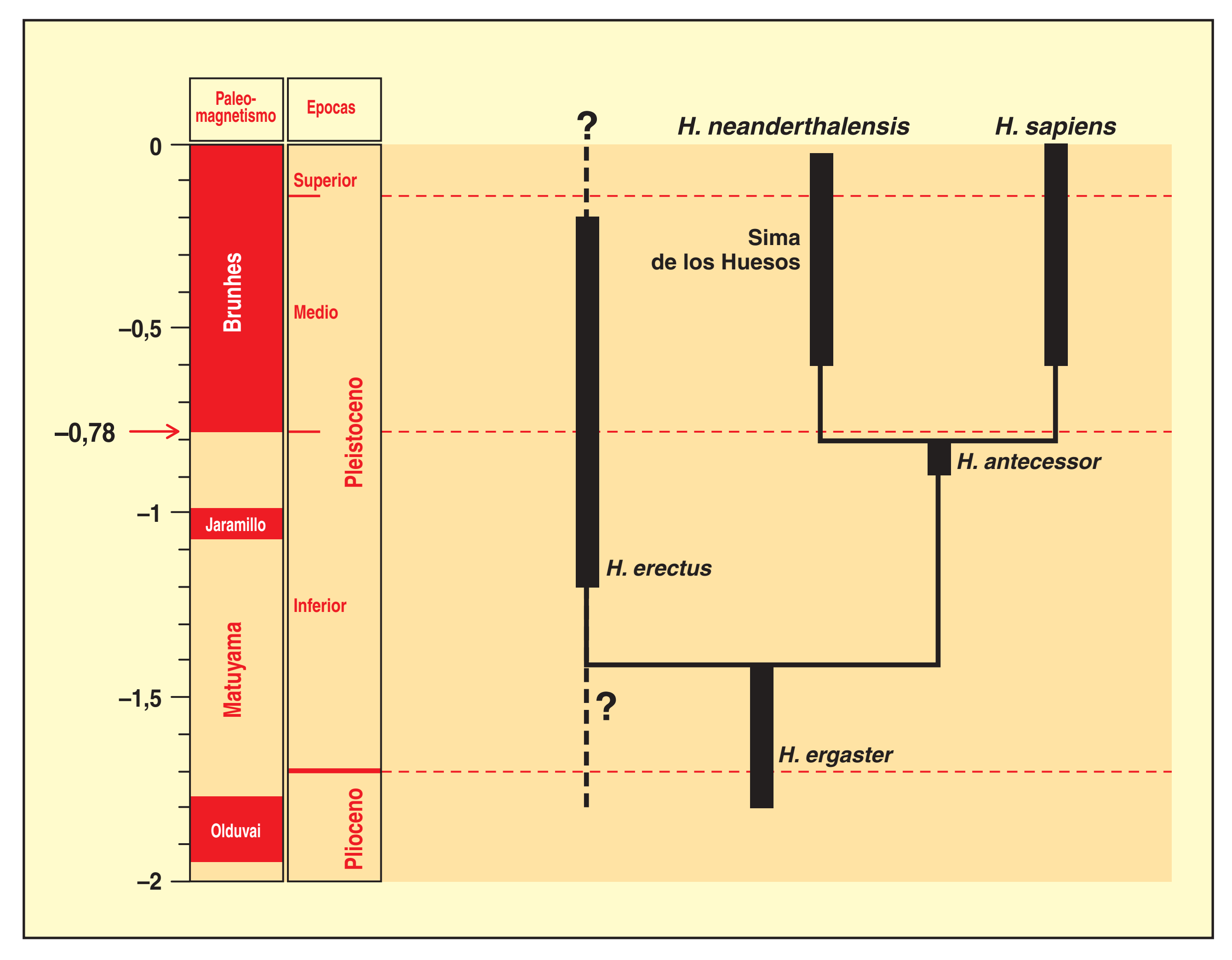
Nosotros creemos, por el contrario, que la hipótesis darwinista de la adquisición gradual de las facultades superiores no carece de apoyo. Nos basamos en la interpretación de los datos suministrados por la arqueología, o pruebas indirectas, y por la anatomofisiología, o pruebas directas.

Los primeros utensilios de piedra se remontan a hace 2,5 millones de años. De algo más de 1,5 millones de años hay hachas líticas, simétricas. Ejemplos inequívocos del uso general del fuego se fechan en hace un cuarto de millón de años. Los neandertales lo dominaban; podían, pues, encenderlo y mantenerlo especies sin nuestro desarrollo cerebral.

Avancemos hasta las primeras expresiones de arte y adorno personal, el nivel de las formas simbólicas. Los primeros testimonios que no ofrecen dudas de interpretación tienen 35.000 años. A mayor

Los autores

JUAN LUIS ARSUAGA e IGNACIO MARTINEZ MENDIZABAL son paleontólogos. Arsuaga, catedrático de paleontología de la Universidad Complutense de Madrid, codirige el equipo de investigación de los yacimientos cuaternarios de la Sierra de Atapuerca. Martínez, docente de la Universidad de Alcalá de Henares, es miembro del equipo de Atapuerca. Ambos investigadores han abordado en diversos trabajos el problema del origen del lenguaje y de las capacidades mentales modernas.



1. ARBOL EVOLUTIVO DEL GENERO *HOMO*. A partir de la especie africana *Homo ergaster* la evolución humana se escindió en dos líneas. Una, exclusivamente asiática, es la de *Homo erectus* (en sentido estricto) y la otra incluye el linaje de los neandertales y el de los humanos modernos. Los neandertales proceden de una evolución local europea a partir de una población fundadora de *Homo antecessor*, oriunda de Africa, y a través de formas intermedias como la representada por la población de la Sima de los Huesos. Nuestra propia especie se originó a partir de la población de *Homo antecessor* que permaneció en Africa.

abundamiento, los neandertales enterraban en ocasiones a sus muertos. Nosotros retrotraemos ese tipo de expresión simbólica mucho más atrás; en la Sima de los Huesos, un yacimiento de hace 300.000 años de la Sierra de Atapuerca, se produjo una acumulación intencionada de una treintena de cadáveres. Por último, la paleoeconomía de hace medio millón de años corrobora que los homínidos no pertenecientes a la especie *Homo sapiens* moderno estaban capacitados para organizarse y planificar sus actividades.

La investigación anatomofisiológica nos permite abordar de un modo directo el problema de la adquisición de las facultades mentales. Aunque no se trata de una opinión compartida, sobre todo en las conclusiones, vale la pena ensayar esa vía. ¿Qué se puede decir, a partir de los fósiles, sobre la evolución del cerebro y del aparato fonador, responsable del lenguaje articulado?

Paleontología del cerebro

Por ser parte blanda el cerebro no fosiliza. El endocráneo retiene, sin embargo, la forma del encéfalo. En las paredes del cráneo quedan también grabados algunos de los relieves de la superficie cerebral. ¿Qué información aportan? Pese a la abundancia de restos, es muy poco lo que se ha conseguido averiguar.

Dean Falk y otros han estudiado los moldes endocraneales de homínidos sudafricanos pertenecientes a la especie *Australopithecus africanus* (la mayoría comprendidos entre 3 y 2,5 millones de años). Aunque el volumen de estos encéfalos (con una media de 450 centímetros cúbicos) es ligeramente mayor que el de los chimpancés (media de 390 cc) y algo inferior que el de los gorilas (media de 500 cc), la organización cerebral parece ser bastante diferente. En los australopitecos se observa, respecto de chim-



2. LA SIERRA DE ATAPUERCA se encuentra muy cerca de la ciudad de Burgos. Es un monte de extraordinaria importancia en los estudios de prehistoria. En sus entrañas conserva el más completo registro fósil de Eurasia, que nos permite investigar la evolución de los ecosistemas y de los seres humanos a lo largo del último millón de años. (Cortesía de Madrid Scientific Films.)

pancés y gorilas, una expansión del sector orbital del lóbulo frontal y del polo anterior del lóbulo temporal. Estas regiones guardan en el cerebro humano relación con algunas de las funciones denominadas superiores; la parte anterolateral del lóbulo temporal, por ejemplo, se activa cuando se reconocen y nombran caras conocidas.

Dos regiones del cerebro asociadas al lenguaje humano son el área de Broca y el área de Wernicke. Ambas han sido localizadas en algunos de los primeros fósiles del género *Homo*, de alrededor de 1,8 millones de años. Ahora bien, lo mismo que en el caso anterior del lóbulo temporal, ésta es una prueba muy débil en favor de un cerebro funcionalmente evolucionado. Algo similar debe decirse de la asimetría del cerebro humano, rasgo que se ha detectado en fósiles muy anteriores a los primeros fósiles de características modernas: no hay pruebas tajantes de la asociación entre asimetría cerebral y presencia de lenguaje.

¿Qué decir del volumen encefálico? Existe una fórmula alométrica que relaciona el peso (o el volumen) del encéfalo con el peso corporal; se expresa por la función $y = bx^a$, donde x es el peso corporal e y representa el peso cerebral. Es fácil calcular los valores de los coeficientes a y b a partir de un conjunto de especies, tal como hizo Robert Martin para los mamíferos (*véase* “Capacidad cerebral y evolución humana”, por Robert D. Martin, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1994). Cuando se sustituye en la ecuación la incógnita x por el peso corporal de un ser humano se obtiene una valor de y (peso cerebral) que resulta ser muy inferior al real. Eso quiere decir que los humanos estamos mucho más encefalizados de lo normal (para ser mamíferos). El cociente entre peso real del encéfalo de una especie de mamífero y el que le “correspondería” según la ecuación se denomina cociente de encefalización (EQ). En nuestra especie alcanza el mayor valor de todos los conocidos (EQ = 5,4). Nos siguen los chimpancés, nuestros parientes más cercanos, con un cociente de encefalización de 2,3. Como grupo, los primates llamados “superiores” (platirrinos y catarrinos) aparecen más encefalizados que el resto de los mamíferos, con la excepción nada sorprendente de los delfines.

Podemos pensar en calcular coeficientes de encefalización de los homínidos fósiles, siempre que tengamos un registro lo bastante bueno como para estimar con fiabilidad los pesos encefálico y corporal. Pero surge un problema cuando se trabaja con los niveles taxonómicos inferiores: el peso del encéfalo y el del cuerpo no siguen ninguna relación lógica; por ejemplo, el cerebro de un mastín es, en proporción, menor que el de un caniche, sin que por ello se muestre menos capaz. Con el gorila asistimos a una curiosa paradoja: pese a dar un valor muy bajo de encefalización (la mitad que un chimpancé), su grado de inteligencia no es menor que el de los chimpancés. Y puesto que todas las especies de homínidos se hallan estrechamente emparentadas cabe cuestionarse la utilidad del enfoque alométrico.

De esa dificultad puede salirse si atendemos a la filogenia (las relaciones evolutivas entre especies). Chimpancés, gorilas y humanos compartimos un antepasado común que vivió hace unos seis o siete millones de años. Debía de ser éste de la talla de un chimpancé actual, que por otro lado es aproximadamente la misma de los primeros homínidos. Chimpancés y primeros homínidos eran más frugívoros (comedores de frutos) que folívoros (comedores de hojas y tallos). En nuestra opinión, los gorilas se volvieron folívoros para aprovechar un recurso muy abundante, lo que les permitió aumentar el peso corporal, pero su cerebro no creció en la misma medida (aunque, como a fin de cuentas el cerebro es un órgano del cuerpo, algo aumentó al hacerse el cuerpo tres veces mayor). Semejante desarrollo dispar puede atribuirse a la enorme inversión energética que requieren la producción y el mantenimiento del cerebro; sólo crece cuando es absolutamente necesario. Por ese motivo los gorilas tienen un cociente de encefalización bajo, sin merma de su inteligencia.

No parece que los australopitecos (EQ en torno a 2,4) alcanzaran un grado de encefalización mucho mayor que los actuales chimpancés, de talla similar también. Se admite que hubo cierta expansión del cerebro, sin cambio en la talla, hace entre 2,5 y 2 millones de años. Esta ganancia encefálica neta podría ir acompañada de un progreso en inteligencia, vinculada a la aparición de las primeras formas del género *Homo*.

Homo ergaster, una especie africana y asiática (encontrada también en la georgiana Dmanisi), surgió hace poco menos de dos millones de años. Presentaba aumentados su encéfalo y su cuerpo, que alcanzó el porte del nuestro. Como resultado del crecimiento a la vez encefálico y corporal, el cociente encefálico no cambió respecto de los primeros representantes de *Homo* (EQ de aproximadamente 2,7). ¿Aumentó su inteligencia? No se sabe. Pero fue el autor de los primeros bifaces. Quizás el crecimiento del encéfalo (con una media cercana a los 900 cc) fue mucho más allá de lo que correspondería a un simple cambio de tamaño corporal. La altura era, sin duda, como la nuestra, mas para certificar la anchura del cuerpo necesitaríamos disponer de una cadera bien conservada.

El yacimiento de la Sima de los Huesos nos ha proporcionado una pelvis muy completa de *Homo heidelbergensis* macho cuya estatura alcanzaría unos 176 cm. Por otros restos no tan completos hallados allí sabemos que se trataba de un varón cercano al promedio. La pelvis presenta una robustez y una anchura mucho mayores que la de cualquier varón actual, de modo que el peso del individuo debía superar los 90 kilogramos. Aunque el peso corporal de las mujeres de la Sima de los Huesos sería menor, hemos encontrado que la diferencia entre los sexos no era entonces mayor que ahora.

El esqueleto recuperado en Jinniushan (China), de antigüedad parecida, muestra características similares. Alan Walker y Chris Ruff creen que la anchura de caderas de *Homo ergaster* era como la nuestra, basados en la reconstrucción, a nuestro juicio errónea, que hicieron del esqueleto de un niño de hace 1,6 millones de años encontrado en Nariokotome (Kenia).

En la población de la Sima de los Huesos el volumen del encéfalo varía entre 1100 cc y casi 1400 cc. Es probable que la media estuviera por debajo del hombre moderno, cifrada entre 1300 cc y 1400 cc (varía con las poblaciones). Pero como el peso del cuerpo era muy superior al de nuestra especie, el cociente de encefalización se hallaría sólo en torno a 3,5.

Más recientemente, hace entre 200.000 y 100.000 años surgieron dos especies humanas que han coexistido hasta hace menos de 30.000 años: los neandertales y nosotros. En ambas líneas se produjeron aumento del encéfalo y reducción del peso corporal. En el caso de los neandertales, la estatura se redujo porque antebrazos y tibias se acortaron en un proceso de adaptación al frío, un fenómeno que se observa también en las poblaciones humanas actuales. Nuestra especie conservó la estatura alta



3. ENCLAVADA en el interior de la cueva mayor de la Sierra de Atapuerca, la Sima de los Huesos es el yacimiento más rico en fósiles humanos del planeta. Aquí se han encontrado, hasta 1999, cerca de 3000 fósiles humanos de una antigüedad próxima a los 300.000 años. Los restos corresponden a una treintena de individuos de todas las edades y ambos sexos, que pertenecieron a una población antecesora de los neandertales. Este hallazgo extraordinario permite, por primera vez en la historia de la paleoantropología, estudiar un grupo humano. La hipótesis considerada por los investigadores del equipo de Atapuerca como la más plausible para explicar el origen de tal acumulación de cadáveres es la de una práctica funeraria, la más antigua conocida. (Cortesía de Madrid Scientific Films.)

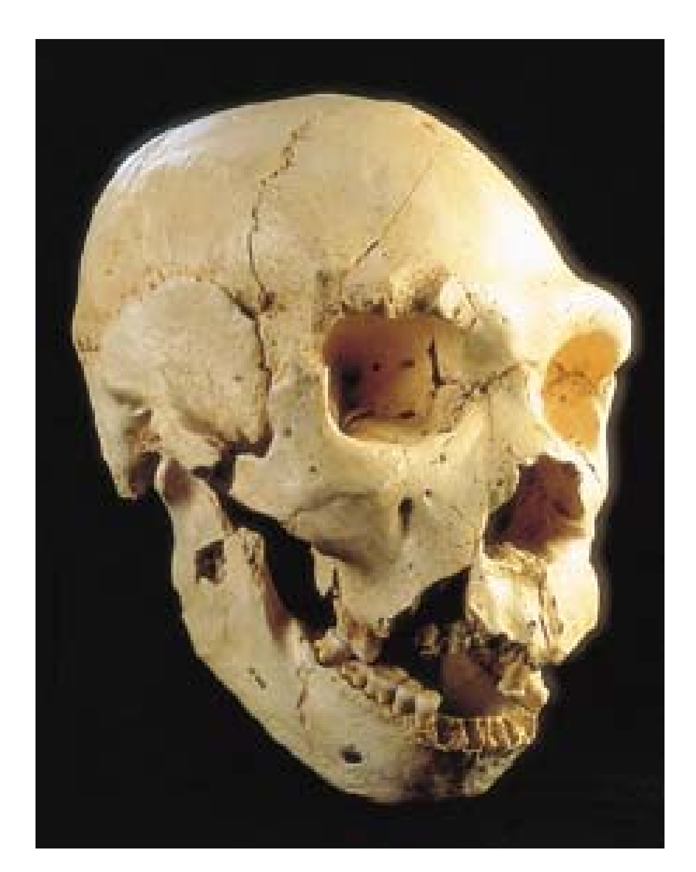
4. LA PELVIS I de la Sima de los Huesos es la mejor conservada del registro fósil de los homínidos. El estudio de su morfología permite determinar la mecánica del parto y la biomecánica de la locomoción en los homínidos de la Sima de los Huesos. Merced a ella podemos reconstruir la forma del cuerpo y, junto con otros restos fósiles del esqueleto de las piernas, estimar con gran rigor el peso del cuerpo. (Cortesía de Madrid Scientific Films.)



pero estrechó las caderas, en una adaptación biomecánica que aproxima entre sí las cabezas de los dos fémures y permite economizar energía en cada paso, aunque, entre otros inconvenientes, dificulta el parto.

En las dos líneas evolutivas, neandertales y "cromañones", se asiste a un aumento del cerebro con disminución del tamaño del cuerpo. La encefalización fue mayor en los neandertales, mientras que la pérdida de peso del cuerpo se notó más en los estrechos "cromañones", razón por la cual los segundos revelan un cociente de encefalización superior (5,3 frente a 5).

Ese proceso de encefalización se produjo, nos lo revela el registro fósil, de una manera gradual. Y si encefalización no es sinónimo obligado de mayor inteligencia, ¿podría hallarse la clave de ésta en el habla?

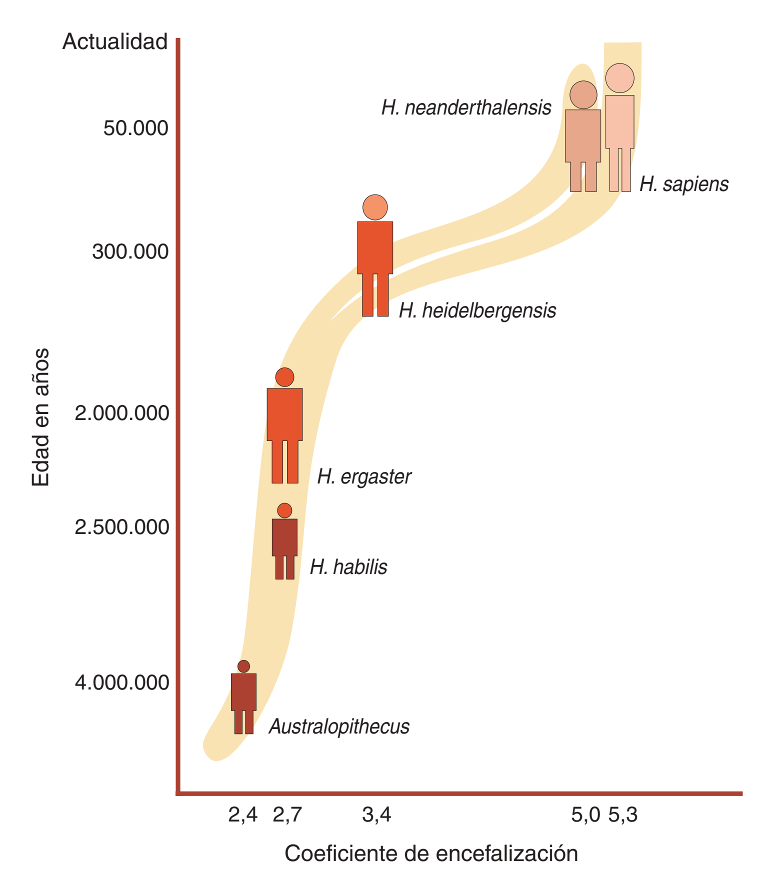


El origen del habla

Entre las características que nos distinguen del resto de los mamíferos destaca la anatomía de nuestras vías aéreas superiores, en particular la posición peculiar de la laringe en el cuello. La laringe es una caja formada por cartílagos que se encuentra justo a la entrada de la tráquea. El mayor de estos cartílagos, el tiroides, está situado en la parte anterior de la laringe y forma la protuberancia que llamamos nuez o bocado de Adán. La laringe alberga las cuerdas vocales, fuente emisora de los sonidos.

Entre la orofaringe y la laringe de las personas adultas queda un intervalo libre, el espacio supralaríngeo, que es una vía común al tubo respiratorio y al tubo digestivo; por ese tracto transitan el aire hacia la laringe y el alimento y los líquidos hacia el esófago. El espacio supralaríngeo resta eficacia al desempeño de algunas de las funciones de las vías aéreas superiores. Además, hace menos eficiente el mecanismo que impide que el alimento se introduzca en el tubo respiratorio, con el consiguiente riesgo de atragantamiento. También hemos perdido la capacidad de respirar por la nariz mientras bebemos. La posibilidad de respirar al tiempo que se traga un líquido es fundamental para la lactancia. Por ello, nuestros bebés tienen la laringe alta en el cuello, en la misma posición que el resto de los mamíferos, y pueden mamar sin necesidad de interrumpir la res-

5. EL CRANEO 5 fue hallado en 1992 en el yacimiento de la Sima de los Huesos. La mandíbula apareció al año siguiente. Se trata del cráneo fósil más completo del registro mundial; corresponde a un individuo adulto. Sobre el maxilar izquierdo se observan las trazas de un proceso infeccioso que pudo derivar en una septicemia grave. (Cortesía de Madrid Scientific Films.)



6. CAMBIOS EN EL COEFICIENTE de encefalización (EQ) a lo largo de la evolución humana. El término *Homo heidelbergensis* se utiliza aquí en el sentido más amplio, que incluye tanto a fósiles europeos como africanos del Pleistoceno medio. Los primeros son antepasados de los neandertales y los segundos de nuestra especie, aunque en la época del yacimiento de la Sima de los Huesos las diferencias eran todavía muy pequeñas y no afectaban al EQ.

piración. En principio, para el adulto resultaría ventajoso respirar mientras bebe, ya que reduce considerablemente el tiempo dedicado a este menester, que suele ser una situación delicada y expuesta a los depredadores.

¿Por qué se perdió, en el curso de la evolución, semejante capacidad tan vital? Darwin admitía que, cuando se trataba de órganos que desempeñaban varias funciones, la selección natural podía especializarlos en una, aun a costa de disminuir su eficacia en el cumplimiento de las demás tareas, si con dicha especialización aumentaban las posibilidades de supervivencia. La especialización de las vías aéreas superiores humanas, con su laringe baja y su amplio espacio supralaríngeo, favorece una de sus funciones: la producción de la amplia gama de sonidos en los que se basa nuestro lenguaje. Parece evidente que la facultad de hablar, esto es, de comunicarse eficazmente, compensa con creces tanto la pérdida de la capacidad de beber y respirar al mismo tiempo, como el riesgo de atragantarse.

Pero la laringe, formada por cartílagos y sostenida por músculos, no fosiliza. Ahora bien, ciertas estructuras óseas relacionadas con ella sí se conservan fósiles. Se trata de la base del cráneo y del hueso hioides.

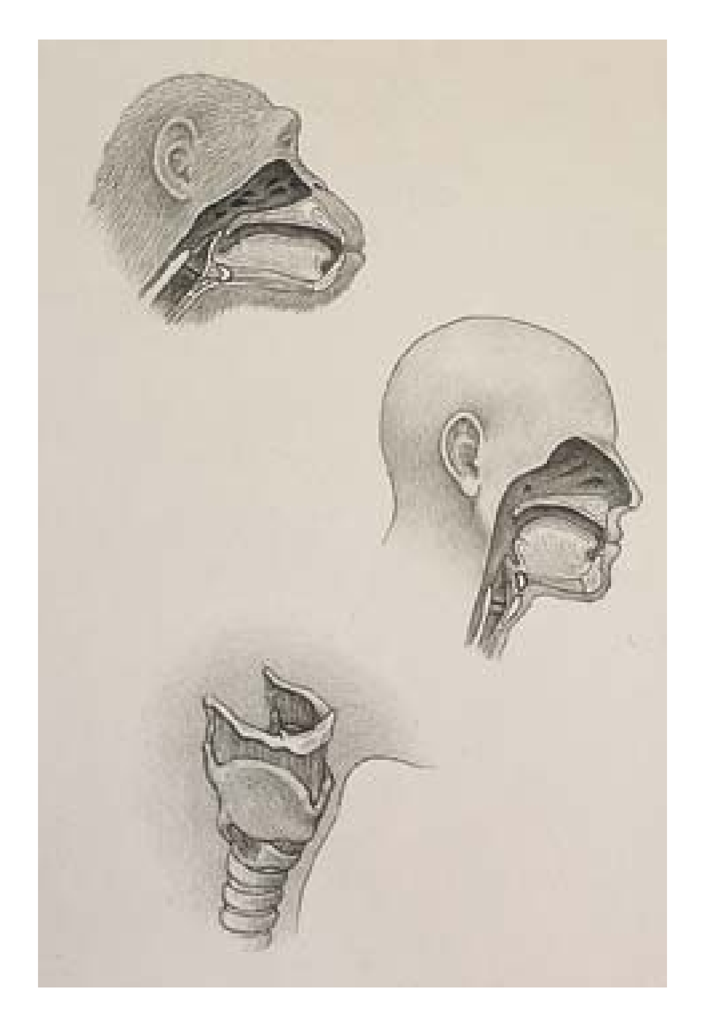
Hasta hace algo más de una década no se conocía ningún hueso hioides fósil de homínido. La investigación debía, pues, centrarse en la anatomía de la base del cráneo. Edmund Crelin, Jeffrey Laitman y Philip Lieberman, trabajando juntos o por separado, establecieron las conclusiones que durante más de veinte años predominaron en ese campo.

Señalaron, en primer lugar, una serie de rasgos anatómicos en los que la base del cráneo de los humanos recién nacidos y la de los chimpancés, cuyas laringes están situadas altas en el cuello, eran muy similares entre sí y diferentes de la morfología de la base del cráneo de los humanos adultos. En esencia, estos rasgos, comunes a humanos recién nacidos y chimpancés, eran los siguientes: base del cráneo poco flexionada entre el final del paladar óseo y el *foramen magnum*; extensa orofaringe, es decir, un amplio espacio situado detrás del paladar duro, y marcada separación entre los huesos basioccipital y vómer. Rasgos que, advirtieron, iban cambiando en el curso del crecimiento hasta alcanzar la morfología típica de los adultos, a la vez que descendía la situación de la laringe en el cuello. Asociaron la posición de la laringe con dichas características anatómicas.

De la investigación sobre fósiles dedujeron que la laringe de los primeros homínidos (*Australopithecus afarensis*, *Australopithecus africanus*, *Homo habilis* y *Paranthropus*) ocupaba la misma posición que en los chimpancés, razón por la cual aquéllos y éstos desarrollarían similares capacidades lingüísticas. Por otra parte, en fósiles del Pleistoceno medio de Africa (Broken Hill) y Europa (Steinheim) encontraron una anatomía basicraneal mucho más próxima a la de los humanos modernos adultos, de la que podía inferirse una posición baja de la laringe.

Fundados en esos resultados, expusieron que la evolución habría seguido dos líneas. En la que llegaba hasta nosotros, el aparato fonador habría sufrido sólo ligeros “retoques”, que lo habrían perfeccionado. En la otra línea, el aparato fonador habría experimentado un proceso de regresión hasta una anatomía convergente de nuevo con la de los chimpancés. A esta rama pertenecerían los neandertales.

Para justificar la pérdida neandertal de la capacidad del habla, aducían que sus vías aéreas superiores habrían cambiado con el fin de especializarse en la función de calentar y humedecer el frío y seco aire de la Europa glacial. Habrían sacrificado una facultad incipiente y quizá todavía no muy importante, el habla, ante una presión de selección más apremiante, la de poder respirar y seguir viviendo. Pero los cráneos neandertales estudiados por Laitman, Crelin y Lieberman conservaban sólo parte de sus



7. ESQUEMA DE LA LARINGE, las vías aéreas superiores de un chimpancé y un humano moderno. La parte anterior de la laringe está constituida por el cartílago tiroides, que forma una protuberancia en el cuello, fácil de distinguir ("nuez" o "bocado de Adán"). En el interior de la laringe se encuentran las cuerdas vocales. La epiglotis es un cartílago con forma de cuchara situado por encima de la laringe y que actúa como una lengüeta, cerrando a los alimentos el paso a la laringe. En las personas adultas la laringe se halla en una posición baja en el cuello, que es la base anatómica de nuestro lenguaje oral. (Cortesía de Madrid Scientific Films.)

bases. Partían, pues, de reconstrucciones. Ahí residía el talón de Aquiles de sus trabajos. Jean-Louis Heim y David Frayer no tardaron en objetarles que la reconstrucción del cráneo neandertal La Chapelle-aux-Saints, el fósil más representativo de la muestra estudiada, era incorrecta; en particular, subestimaba su flexión basicraneal.

En 1989 apareció, en el yacimiento israelí de Kebara, el primer hueso hioides fósil del registro de los homínidos. El yacimiento de Kebara data de hace unos 60.000 años y en él se ha hallado un esqueleto bastante completo de un ejemplar neandertal, aunque le falta el cráneo y los huesos de las piernas. Del hioides, situado en la región posterior del suelo de la boca, arrancan varios músculos de la lengua y otros que elevan la laringe. Nuestros parientes vivos más próximos, los chimpancés, tienen un hueso hioides cuya morfología difiere bastante de la forma adquirida en los humanos modernos. Puesto que el hioides de Kebara es esencialmente idéntico al del hombre moderno, sus descubridores, encabezados por Baruj Arensburg, supusieron que el resto del aparato fonador de los neandertales, posición de la laringe incluida, hubo de ser similar al de los humanos modernos.

Sin embargo, el afirmar que a partir de la morfología del hueso hioides puede establecerse la del conjunto del aparato fonador constituye, para muchos autores, una inferencia arriesgada. Máxime cuando no ha sido posible establecer ninguna relación funcional entre la anatomía del hioides y la posición de la laringe, el aspecto más determinante de nuestro aparato fonador.

Así las cosas, en el mes de julio de 1992 encontramos en el yacimiento de la Sima de los Huesos el cráneo humano fósil más completo del registro, que conserva casi intacta su base; se trata del espécimen designado con el nombre de Cráneo 5. Perteneció a un individuo adulto que vivió hace cerca de 300.000 años y que formó parte de una población precursora de los neandertales. Dos años más tarde desenterrábamos la mayor parte de un hueso hioides humano, lo que convertía al yacimiento en el único en el mundo que aportaba todas las pruebas anatómicas relacionadas con el aparato fonador: la base del cráneo y el hueso hioides. En 1997 recuperamos un segundo hueso hioides.

Cuando se dispone de un material fósil tan excepcional se hace preciso retomar los problemas desde el principio. Nos propusimos evaluar la validez de los rasgos anatómicos de la base del cráneo que se venían usando para la reconstrucción del aparato fonador de los homínidos fósiles. El proyecto, ambicioso, requería realizar mediciones y examinar un número suficiente de cráneos de humanos modernos y de antropoides. Estudiamos la práctica totalidad de las bases de cráneo fósiles.

Y llegamos a una primera conclusión: para reconstruir la posición de la laringe en el cuello no resulta imprescindible la flexión basicraneal; no existe una relación directa entre ambas variables. Daniel Lieberman y Robert McCarthy han respaldado nuestra tesis en un trabajo reciente sobre el descenso en la posición de la laringe y la flexión de la base del cráneo a lo largo del crecimiento, en una muestra amplia de niños. Observamos, además, que la existencia de una amplia orofaringe no era un carácter exclusivo de los humanos recién nacidos y de los chimpancés.

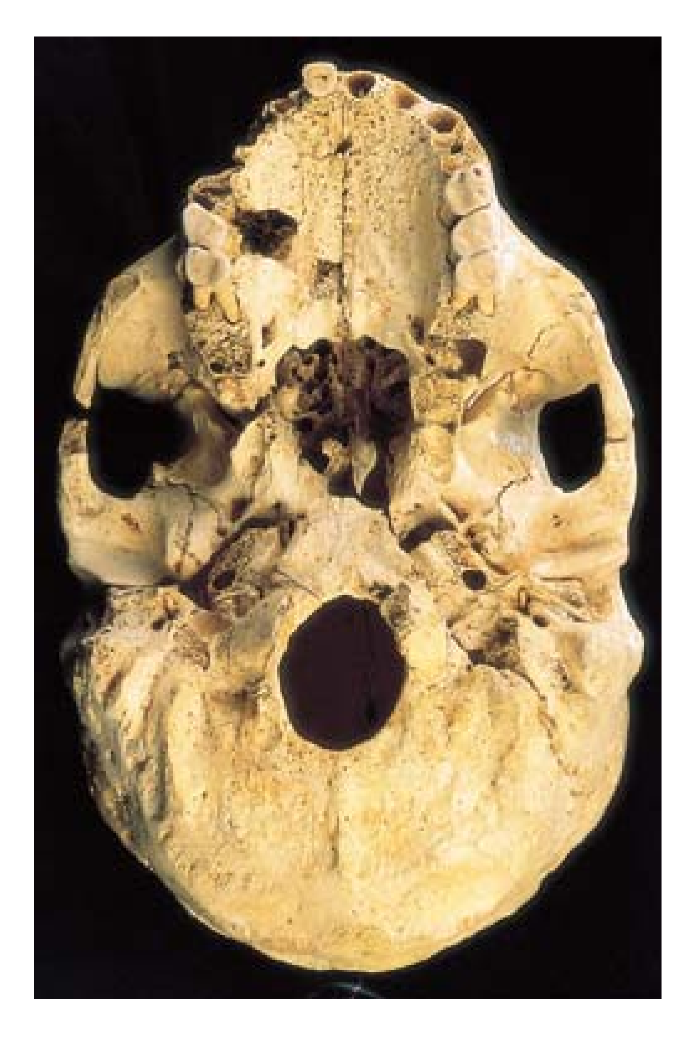
En el curso de nuestra investigación, reparamos en un elemento de interés en el estudio del aparato fonador, el músculo constrictor superior de la faringe. Desempeña éste una importante función en la deglución de los alimentos y en los cambios que experimenta la sección de la faringe al producir los sonidos vocálicos, que son la base de nuestro lenguaje oral. Christopher Dean ha puesto de manifiesto que

la morfología del músculo constrictor superior de los humanos modernos difiere de la que exhibe en los antropoides, morfología dispar que se expresa en el modo de su inserción en la base del cráneo.

De nuestro análisis de la morfología basicraneal del Cráneo 5 se desprende que éste coincide con los humanos modernos en un doble aspecto, a saber, en la distancia entre el vómer y el basioccipital y en la inserción del músculo constrictor superior de la faringe. Súmese a ello que los dos huesos hioides de la Sima de los Huesos también son como los de las poblaciones humanas modernas (es decir, mucho más próximos a los nuestros que a los hioides de los chimpancés). Apoyados en la morfología de la base del Cráneo 5, de tipo humano moderno, y en los huesos hioides, creemos que la posición de la laringe de los fósiles de la Sima de los Huesos hubo de ser también de tipo humano moderno, y que, por tanto, podían hablar.

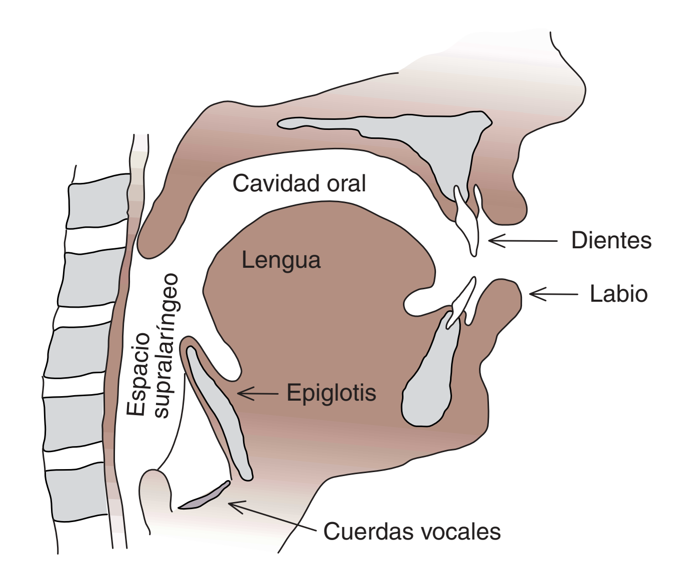
Pero aún queda otro aspecto por considerar. Nuestro aparato fonador consta de dos segmentos, uno vertical, constituido por el espacio supralaríngeo entre la orofaringe y la laringe, y otro horizontal, formado por la cavidad oral y la orofaringe. Para producir los sonidos básicos del habla humana, las vocales /a/, /i/ y /u/, es preciso que el segmento horizontal sea de una longitud equivalente a la del segmento vertical. Los chimpancés tienen un largo hocico que determina un largo segmento horizontal; por otra parte, la posición alta de su laringe reduce la longitud del segmento vertical. Las personas tenemos un segmento vertical alargado por el descenso en la posición de la laringe, mientras que la longitud de nuestra cara se ha acortado, reduciendo el segmento horizontal. El resultado es que en las personas ambos segmentos alcanzan una longitud similar.

Ahora bien, el acortamiento de la cara es algo peculiar de nuestra especie. Los homínidos de la Sima de los Huesos y los neandertales, así como nuestros antepasados pre-modernos, presentan un prognatismo acentuado, lo que determina la existencia de un seg-

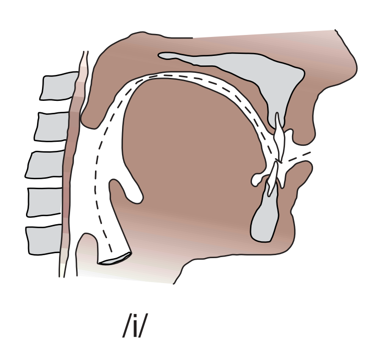


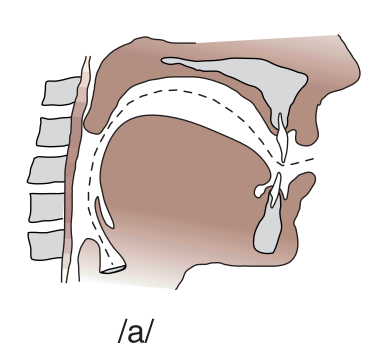


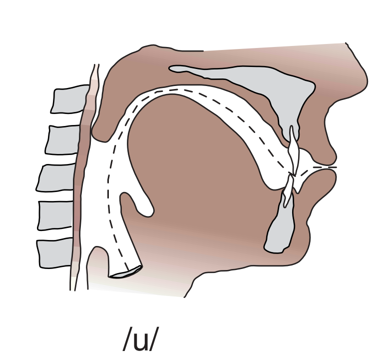
8. LOS ESTUDIOS REALIZADOS para reconstruir el aparato fonador de los neandertales, a partir de la morfología de su basicráneo, han sido muy criticados porque se han basado en reconstrucciones sobre material muy fragmentario. Uno de los fósiles clave en ese contexto es el cráneo neandertal de La Chapelle-aux-Saints, que ha perdido la mayor parte de su base. El Cráneo 5 de la Sima de los Huesos conserva la práctica totalidad de su base, lo que lo hace idóneo para estudiar la evolución del aparato fonador de los humanos. (Cortesía de Madrid Scientific Films.)



9. PARA PRODUCIR EL SONIDO /a/, la lengua se aplana en la cavidad bucal y se desplaza hacia atrás para estrechar la faringe. Al producir el sonido /i/ la lengua se eleva, estrechando la cavidad bucal, y la faringe se ensancha. En el caso de la /u/, tanto la cavidad bucal como la faringe se ensanchan, mientras que la parte posterior de la lengua asciende para producir un estrechamiento en la parte posterior del paladar. En los tres casos, las modificaciones de la sección del aparato fonador tienen lugar en su región central, lo que sólo se puede realizar cuando los dos segmentos del aparato fonador tienen la misma longitud.







mento horizontal del aparato fonador más largo que el segmento vertical, aun cuando éste se haya visto prolongado por el descenso de la laringe. En consecuencia, los humanos de la Sima de los Huesos podían hablar, pero los sonidos que podían articular diferían de los que componen nuestro lenguaje. En concreto, carecerían de las vocales /i/, /u/ y /a/. Estas vocales, muy fáciles de articular, son las que se distinguen con mayor nitidez y se dan en todas las lenguas. Su uso hace más eficaz, más rápido e inteligible el lenguaje oral.

Para hablar no basta con producir un repertorio variado de sonidos, hay que tener algo que decir. De nada sirven unas vías aéreas superiores capaces de producir palabras si el cerebro no utiliza esta facultad. Parece lógico que las capacidades mentales implicadas en el lenguaje aparecieran con anterioridad a la modificación de las vías aéreas superiores, pues cabe suponer que fueron dichas capacidades las que hicieron rentable, en términos de selección natural, la extraña posición de nuestra laringe.

A partir de estos datos, nosotros contemplamos la evolución de la inteligencia como un proceso esencialmente darwinista. En los primeros representantes de *Homo*, el cerebro experimentó una expansión ligada a la aparición de capacidades nuevas, que hicieron posible la talla sistemática de la piedra. Estas nuevas facultades dieron sentido a la capacidad de hablar, rentabilizando el descenso en la posición de la laringe. Puesto que los humanos de la Sima de los Huesos ya tenían la laringe baja, este proceso debió de ocurrir antes de la separación de las líneas evolutivas de los neandertales (en cuya ascendencia está la población de la Sima de los Huesos) y de la humanidad actual. Pudo suceder en *Homo antecessor* o quizá mucho antes, en *Homo ergaster* u *Homo habilis*. El último paso tuvo lugar sólo en nuestra propia línea evolutiva y consistió en el acortamiento del segmento horizontal del aparato fonador, lo que le confirió mayor eficacia en la comunicación oral y redundó en un nuevo incremento de la complejidad social, que pudo ser, a la larga, la causa de la sustitución de los neandertales por la humanidad actual.

Bibliografía complementaria

LA ESPECIE ELEGIDA. Juan Luis Arsuaga e Ignacio Martínez. Ed. Temas de Hoy, Madrid, 1998.

ARQUEOLOGÍA DE LA MENTE. Steven Mithen. Ed. Crítica, Barcelona, 1998.

EL COLLAR DEL NEANDERTAL. Juan Luis Arsuaga. Ed. Temas de Hoy, Madrid, 1999.



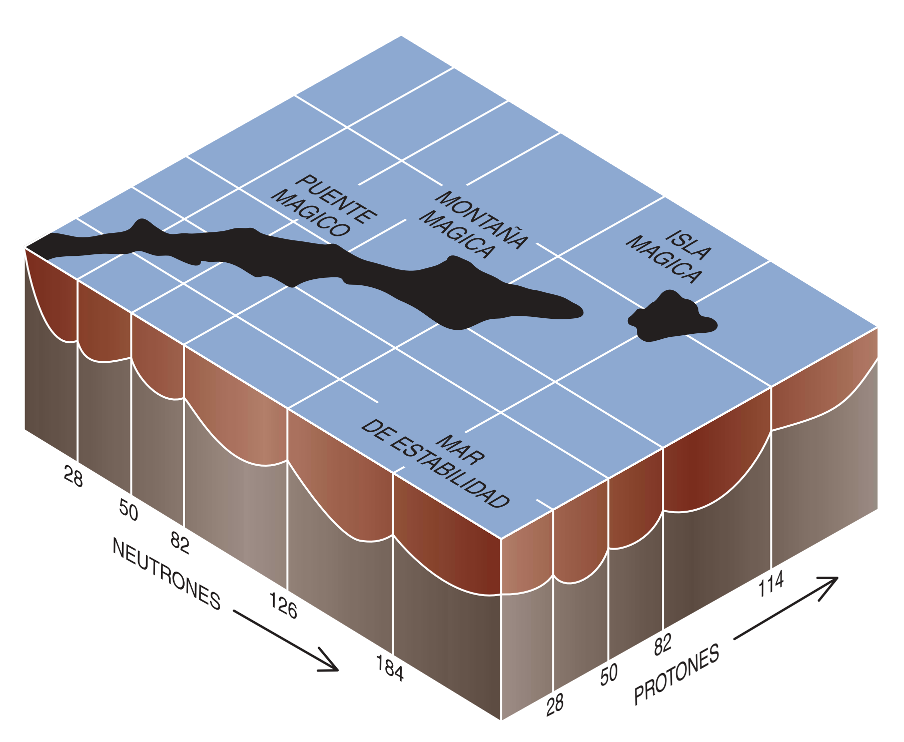
Veinticinco años de ciencia química

Pere Molera

Llamamos ciencia al conocimiento organizado del mundo físico. La ciencia nace de dos operaciones fundamentales: la observación y el razonamiento. La observación consiste en la contemplación profunda de los hechos y en describirlos lo más exactamente posible. Al multiplicarse las observaciones se encuentran regularidades que el científico enuncia en forma de leyes. La razón de cada ley radica en un conjunto de supuestos o hipótesis. Cada ley se refiere a un gran número de hechos resumidos. Si las hipótesis sirven para predecir nuevos hechos, análogos a los observados, es decir, si las hipótesis son válidas constituyen una teoría.

La química es la ciencia que estudia la estructura, las propiedades y la transformación de la materia. Es decir, todo el universo constituye el objeto de la química. Pero, ¿qué es la estructura? En una primera aproximación nos remite a la disposición de los elementos internos de un objeto, es decir, la arquitectura de sus partes más sencillas. La estructura subatómica implica la posición relativa de los electrones en los átomos individuales y las interacciones con sus núcleos. A nivel atómico, la estructura abarca la organización de átomos y moléculas. En este sentido, la siguiente estructura de largo alcance consiste en grupos de átomos enlazados entre sí y se denomina estructura cristalina. Denominamos microestructura a la disposición de la estructura cristalina dentro de los materiales; sólo es visible con el auxilio del microscopio. La estructura percibida con los ojos entra en la categoría de macroscópica.

Para definir las propiedades de la materia nos fijamos en el tipo y la magnitud de la respuesta ante un estímulo específico externo. Todas las propiedades importantes de la materia se agrupan en cuatro categorías: mecánicas, físicas (eléctricas, térmicas, magnéticas y ópticas), químicas y técnicas. Una misma clase de estímulo puede provocar respuestas diferentes. Así, algunas propiedades mecánicas relacionan la deformación con el esfuerzo aplicado o tensión; pensemos, por ejemplo, en el módulo elástico, el límite elástico y la resistencia mecánica. En



1. CAMPO DE ESTABILIDAD de nuevos elementos químicos en el espacio tridimensional número de protones-número de electrones-estabilidad. Se aprecia la existencia de una península y de una isla de estabilidad.

El autor

PERE MOLERA SOLA, profesor de la facultad de química de la Universidad de Barcelona, autor de 17 libros y 150 artículos de su especialidad (química metalúrgica), dirige desde hace 10 años un máster a distancia en tecnología de pinturas, que imparte la mencionada institución.

La evolución de la química se ha traducido en la obtención de nuevos elementos, en la producción limpia mediante la síntesis enantiomórfica selectiva y total, y en el desarrollo de supramoléculas y de nuevos materiales

las propiedades eléctricas, tales como la conductividad eléctrica y la constante dieléctrica, el estímulo es un campo eléctrico. El comportamiento térmico se representa en función de la capacidad calorífica y de la conductividad térmica. Las propiedades magnéticas revelan la respuesta de un material a la influencia de un campo magnético. Para las propiedades ópticas, el estímulo lo constituye la relación electromagnética o lumínica; el índice de refracción y la reflectividad son propiedades ópticas representativas. Por último, las características químicas indican la reactividad de la materia.

La química se ocupa también de la transformación de la materia desde los reactivos hasta los productos de la reacción. Evidentemente, estas transformaciones no ocurren porque las leyes científicas así lo determinan, sino que se formula la ley porque se ha observado una regularidad en el comportamiento. Las leyes se limitan a describir lo observado en la naturaleza y su transformación.

104	RUTERFORIO (Rf)	$^{249}Cf + ^{12}C \rightarrow ^{257}Rf + 4n$
		$^{249}Cf + ^{13}C \rightarrow ^{259}Rf + 3n$
105	HAHNIO (Ha)	$^{249}Cf + ^{15}N \rightarrow ^{260}Ha + 4n$
106	SEABORGIO (Sg)	$^{249}Cf + ^{18}O \rightarrow ^{263}106 + 4n$
107	BOHRIO (Bh)	$^{209}Bi + ^{54}Cr \rightarrow ^{262}107 + n$
108	HASIO (Hs)	$^{208}Pb + ^{58}Fe \rightarrow ^{265}108 + n$
109	MEITNERIO (Mt)	$^{209}Bi + ^{58}Fe \rightarrow ^{266}109 + n$
		$^{209}Bi + ^{59}Co \rightarrow ^{267}110 + n$
		$^{208}Pb + ^{62}Ni \rightarrow ^{269}110 + n$
110		$^{208}Pb + ^{64}Ni \rightarrow ^{271}110 + n$
		$^{244}Pu + ^{34}S \rightarrow ^{273}110 + 5n$
111		$^{209}Bi + ^{64}Ni \rightarrow ^{272}111 + n$
112		$^{208}Pb + ^{70}Zn \rightarrow ^{277}112 + n$

2. NUEVOS ELEMENTOS QUIMICOS y reacción nuclear de obtención.

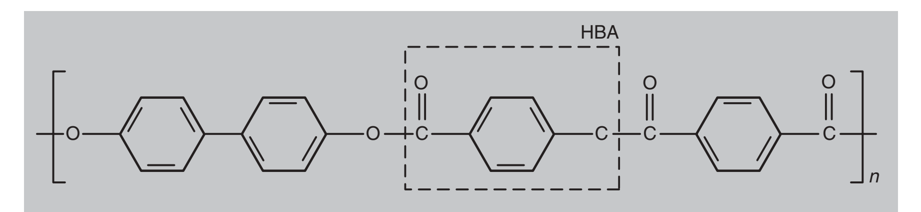
A grandes rasgos la evolución de la química en los últimos 25 años se ha traducido en la síntesis de nuevos elementos con larga vida media, en la producción ecológica y rentable mediante la síntesis enantiomórfica selectiva y total, en el desarrollo de supramoléculas, síntesis de nuevos materiales y en el desarrollo de técnicas de control y de caracterización mucho más precisas. Veamos con cierto pormenor cada uno de estos apartados.

La síntesis de nuevos elementos químicos con vida media apreciable ha sido posible gracias a la estabilidad a la fisión nuclear de los elementos generados. A principios de los años setenta del siglo pasado, Vilen Strutinsky y Wladyslaw Swiatecki formularon la teoría de la vida media larga de los elementos con número de protones superior a 114 y número de neutrones superior a 184. En el espacio tridimensional número de protones-número de electrones-estabilidad se aprecia que la estabilidad de los elementos químicos aumenta considerablemente cuando el número de protones y el número de neutrones coinciden. Por este motivo, en una representación gráfica de las tres variables citadas, aparece una figura que recuerda el aspecto de una península y de una isla que emergen en un mar de inestabilidad. Todo esto se ha podido comprobar experimentalmente sintetizando los transnobelios: ruterforio, hahnio, seaborgio, bohrio, hasio, meitnerio (109) y tres elementos más sin nombre propio.

Se ha puesto de moda la palabra “ecológico”. De la gasolina a los procesos industriales se propone que todo sea “limpio”, es decir, que no agreda al entorno. En el sector productivo se impone así la sinterización a la fusión, el medio acuoso al medio disolvente, la temperatura ambiente a las altas temperaturas, la deformación plástica de los materiales

M = 2H o ZN(II)

3. SUPRAMOLECULA de bis porfirina, obtenida a partir de complejo Zn (II) de la porfirina con dos grupos uracilo. De este modo se pueden fabricar tubos de paredes peptídicas.

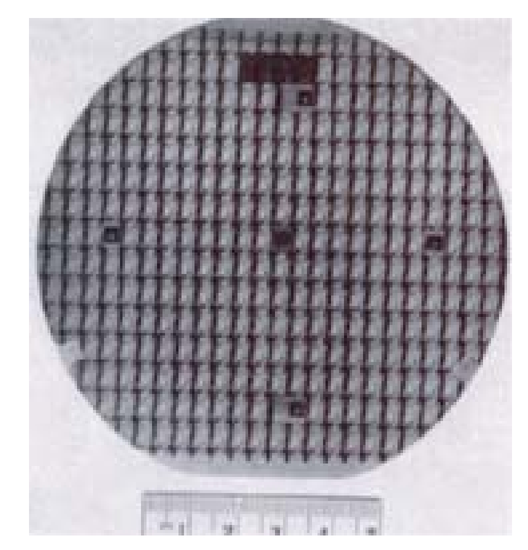


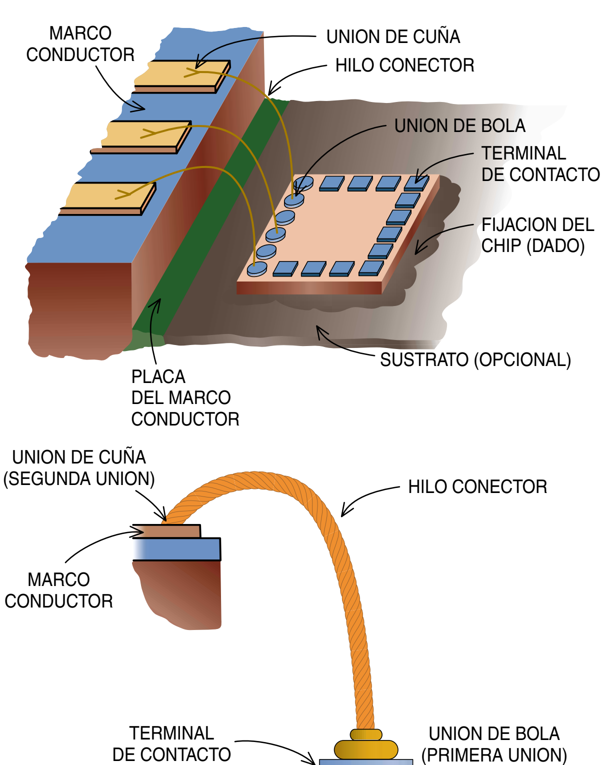
4. MACROMOLECULA obtenida a partir de la polimerización del ácido hidroxibenzoico (HBA). Cuando estas macromoléculas se unen paralelamente entre sí por puentes de hidrógeno dan lugar a cristales líquidos.

al mecanizado, para reducir la posible contaminación. En esa dirección el primer paso a dar consiste en eliminar residuos. En toda reacción química se intenta que A + B → AB, en lugar de A + B → C + D. A menos productos de desecho, menos contaminación.

El proceso de transformación de la materia halla su coronación en la síntesis, en la elaboración de un producto a partir de los reactivos. El taxol, substancia muy utilizada para tratar el cáncer, es un producto natural que se obtiene de la resina del tejo, árbol común en España. En la industria, la síntesis total del taxol se lleva a cabo, según esquema de K. C. Nicolaou y E. J. Sorensen, a partir de la 3-hidroxi-2-pirona y éster α, β-insaturado, con la contribución de los catalizadores más adecuados y los grupos auxiliares quirales más idóneos para conseguir el máximo rendimiento en los enantiomorfos más útiles: es la denominada síntesis enantiomórfica selectiva.

A esa fabricación pudo llegarse mediante la aplicación de una retrosíntesis analítica del taxol natural. Dicho procedimiento consiste en ir degradando la macromolécula y analizando, con técnicas cromatográficas y espectroscópicas, los productos resultantes. La primera etapa del proceso condujo a la identificación del esqueleto del 6-8-6 triciclo carbono unido, mediante enlace tipo éster, a una cadena de fenilresina, donde se detectó la presencia de 3-hidroxi-2-pirona y del éster α, β-insaturado. Se trata de dos substancias sintéticas, sencillas y fácilmente asequibles, a partir de materias primas de origen petroquímico (ácidos pirúvico y 5-hidroxi propanoico).

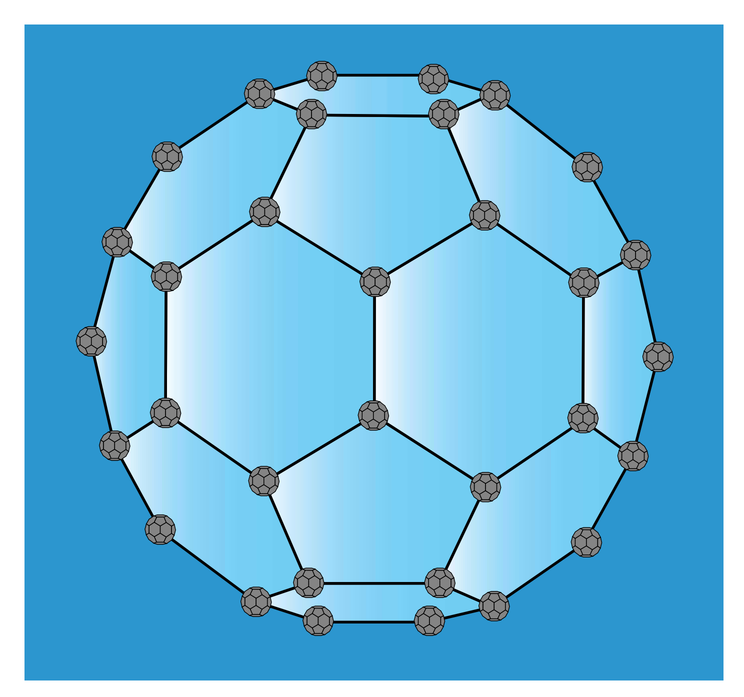




5. ASPECTO DE UNA OBLEA de silicio de 10 cm (*arriba*). Los rectángulos están ocupados por un chip. Se da un esquema del mismo, con el detalle de la soldadura bola-cuña (*centro* y *abajo*).

En las agrupaciones atómicas cabe hacer hincapié en la aparición de los agregados de átomos metálicos (por ejemplo el Au_{55}) y carburos de carbonilos metálicos, así el $Ru_3(CO)_{12}$ y el $Os_3(CO)_{12}$. La inclusión de estos agregados en polímeros puede transformar la dielectricidad en conductividad eléctrica.

Las macromoléculas o polímeros son moléculas de peso molecular comprendido entre 10^3 y 10^9. Están constituidas, generalmente, por una cadena de átomos de carbono unidos entre sí mediante enlaces sencillos, dobles y triples. Otros átomos unidos al carbono son el hidrógeno, el nitrógeno y el oxígeno. Muchas macromoléculas tienen átomos de hidrógeno substituidos por cadenas laterales de átomos de carbono. Hasta mediados del siglo XX se utilizaron macromoléculas naturales, como el asfalto, la madera, la lana y el algodón. Aparecieron luego los polímeros sintéticos: acetato de celulosa, resinas fenólicas, poliestireno, cloruro de polivinilo, nylon, poliéster, polietileno, siliconas, resinas epoxi, ABS, polipropileno, poliestireno, policarbonatos, poliamidas y poliuretanos. Recientemente, la química de los poliuretanos ha experimentado un notable avance al lograr controlar la reaccionabilidad de los grupos



6. ESTRUCTURA DEL FULLERENO C_{60}. Los átomos de carbono que constituyen los hexágonos tienen dobles enlaces resonantes entre átomos de carbono vecinos, como si se tratara del benceno.

isocianato (–N=C=O) con substancias capaces de bloquearlos y de activarlos cuando las circunstancias lo requieren. De este modo se han conseguido plásticos de gran resistencia mecánica, parecida a la de los metales.

Las supramoléculas son agrupaciones moleculares de gran peso molecular. Están constituidas por un conjunto de macromoléculas unidas entre sí mediante uniones transitorias, es decir, enlaces de tipo puente de hidrógeno y fuerzas de van der Waals. Para la unión que caracteriza a la supramolécula adquiere especial relevancia la geometría de las macromoléculas componentes; a menudo, algunas macromoléculas adoptan la forma de cavidades donde pueden acomodarse otras moléculas, átomos o iones.

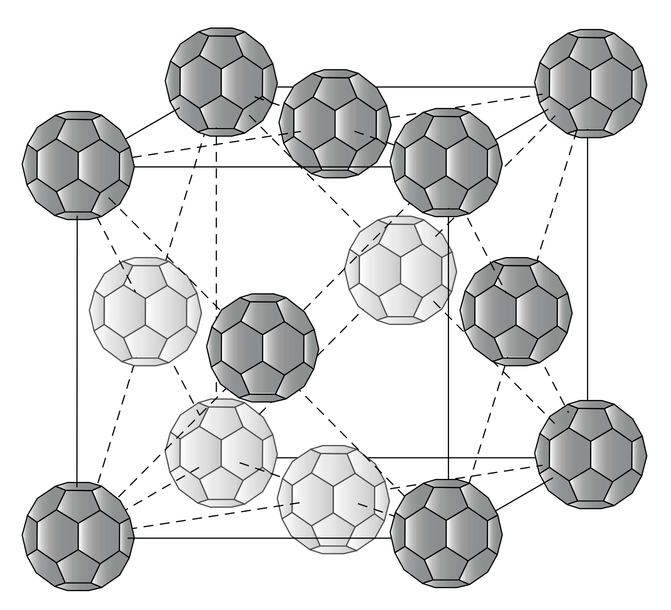
Estableciendo un paralelismo entre el átomo, la molécula y la supramolécula con la gramática, podríamos decir que el átomo equivale a la letra, la molécula se identifica con la sílaba, la macromolécula coincide con la palabra y la supramolécula se compara con la frase. Las dimensiones de las supramoléculas son del orden del nanómetro.

Entre las propiedades de las supramoléculas se encuentran las de reconocimiento de iones, átomos y moléculas, lo que posibilita la aplicación de estos agregados en biosensores y en membranas selectivas, así como en determinados materiales que muestren tixotropía, es decir, una notable variación de viscosidad con el esfuerzo cizallante aplicado. A este respecto merece citarse un tipo de polímero que se destina para fabricar cristales líquidos. La macromolécula en cuestión se obtiene a partir de la polimerización del ácido hidroxibenzoico (HBA). Y los polímeros se enlazan entre sí por puentes de hidrógeno. Aunque carecen de la fragilidad del vidrio, presentan cierta elasticidad, lo que facilita su aprovechamiento para pantallas de ordenadores portátiles.

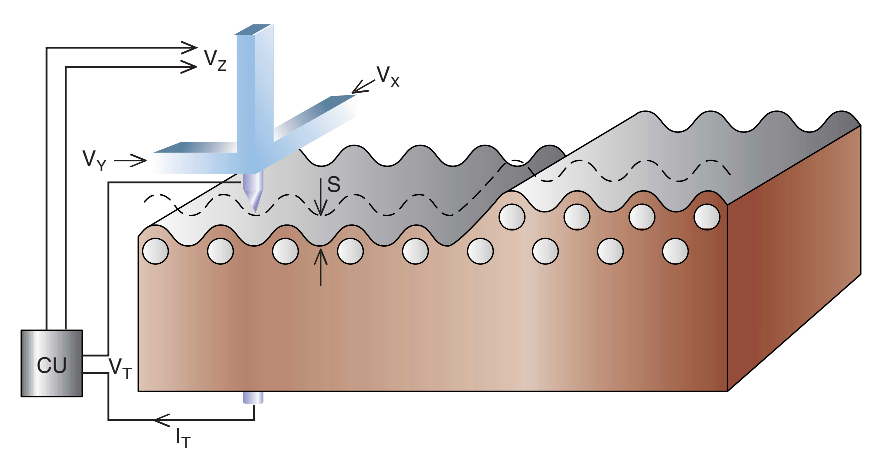
En el ámbito de los nuevos materiales hemos asistido a la aparición de substratos de dimensiones milimétricas con espectaculares propiedades electromagnéticas. Nos referimos a los chips, que han revolucionado la industria de las telecomunicaciones. Los viejos aparatos de radio detectaban la señal de las ondas herzianas mediante tubos catódicos encerrados en válvulas de vacío. Su substitución posterior por transistores compuestos de semiconductores permitió reducir el tamaño del receptor.

Entre los nuevos materiales aparecidos en los últimos 25 años cabe citar los fullerenos. El primer fullereno, el C_{60}, fue sintetizado por Richard E. Smalley y Robert F. Curl, de la Universidad de Sussex. Obtuvieron muestras de pequeñas cantidades de C_{60} en fase gaseosa, dieron nombre a la molécula y, lo más importante, pudieron deducir su estructura, aunque sólo hubieran conseguido 10^{10} moléculas en vez de 10^{20} que son las que se necesitan para verlas en un cristal pequeño.

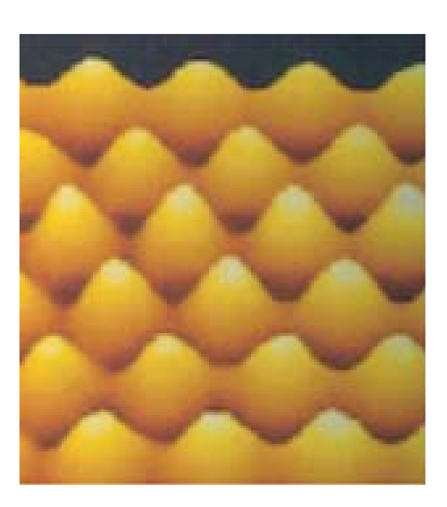
Donald R. Huffman, de la Universidad de Arizona, y Wolfgang Krätschmer y Konstantinos Fostiropoulos, del Instituto Max Planck de Física Nuclear en Heidelberg, consiguieron, por medio de una descarga eléctrica con electrodos de grafito en atmósfera de helio, hollín que se disolvía en benceno y en tolueno. Evaporando la disolución, aislaron un polvo marrón amarillento. La caracterización



7. DISPOSICION DE LOS FULLERENOS C_{60}, que da lugar a estructura cúbica centrada en las caras con huecos octaédricos y tetraédricos.



8. MICROSCOPIO DE EFECTO TUNEL. La unidad de control CU aplica una fuerza electromotriz a la punta detectora y se recoge una corriente I_T en la superficie conductora, objeto de la observación. V_X, V_Y, V_Z y V_T indican las velocidades respecto a los ejes *x*, *y* y *z* y respecto al tiempo. S indica la distancia punta-superficie.



9. SUPERFICIE de una lámina de oro observada con el microscopio de efecto túnel.

de este polvo mediante espectroscopía infrarroja, resonancia magnética nuclear y difracción de rayos X, confirmó la presencia de algunos gramos de fullereno C_{60}, suficiente al menos para que la molécula defina su estructura por medio de los típicos modelos orgánicos (12 pentágonos y 20 hexágonos con átomos de carbono tetravalente en los vértices), y suficiente también para convencer al más escéptico de su estructura en forma de balón.

Con los años se identificarían nuevos fullerenos. Desde el C_{36} a otros de mayor masa molecular. Son materiales de baja densidad (1,65 g/cm^3), relativamente blandos y aislantes eléctricos. El fullereno C_{60} puede unirse con tres iones potasio, que ocupan posiciones intersticiales tetraédricas u octaédricas, y así se obtiene un K_3C_{60} con las propiedades propias de los metales: gran conductividad eléctrica y superconductor a 18 K. Se trata del primer metal molecular.

La caracterización ha evolucionado rápida y profundamente. Recordaremos, por botón de muestra, el microscopio de efecto túnel, cuyo principio reside en la conductividad electrónica que pasa por una punta metálica afilada que recorre, sin contactar, una superficie conductora. Los electrones, debido a la dualidad partícula-onda, llegan a la punta en función de la proximidad de la superficie explorada. El microscopio va dibujando y reproduciendo la superficie observada. De este modo, se pueden "ver" los átomos y los defectos atómicos existentes en una superficie.

Bibliografía complementaria

SUPRAMOLECULAR CHEMISTRY. J. M. Lehn. VCH; Weinheim, 1995.

TOTAL SYNTHESIS. K. C. Nicolaou y E. J. Sorensen. VCH; Weinheim, 1996.

THE NEW CHEMISTRY. Dirigido por N. May. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.

W. Wayt Gibbs

PETER H. DUESBERG: ¿Disidente o quijote?

Hace tres siglos, los cardenales que huían de una plaga que asolaba Milán se refugiaron aquí, en la villa San Carlos Borromeo de Sonago, que domina la ciudad desde su colina. La quinta y sus habitantes actuales pasan por tiempos duros. El yeso resquebrajado y las desvaídas pinturas de sus altas paredes se han recubierto con arte moderno de dudosa calidad. Ahora es el museo privado de Armando Verdiglione, otrora acreditado psicoanalista cuya reputación quedó mancillada en 1986 tras una sentencia por estafa a sus acaudalados pacientes. En sus estancias hallan hospedaje disidentes científicos de todas partes del mundo, invitados por Verdiglione para disertar ante una ecléctica asistencia compuesta de un centenar de oyentes.

En el lado del estrado opuesto a Verdiglione se encuentra Sam Mhlongo, antiguo guerrillero y compañero de prisión de Nelson Mandela, que hoy dirige el departamento de medicina familiar y atención primaria de la Universidad de Sudáfrica en Pretoria. Mhlongo ha apremiado al presidente Thabo Mbeki a cuestionar la casi universal convicción de que el sida es una epidemia en Sudáfrica y el VIH su causa.

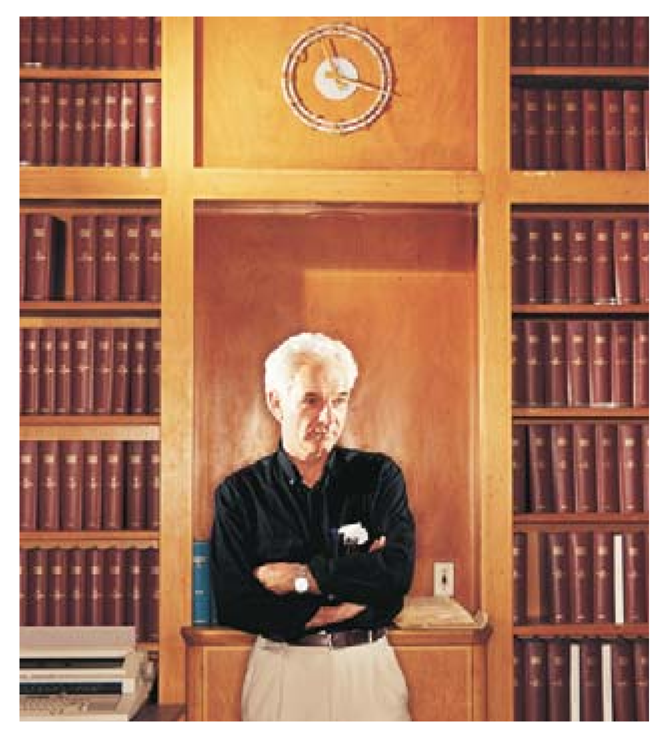
Entre ambos ocupa su asiento Peter H. Duesberg, un virólogo norteamericano que también ha puesto en tela de juicio la tesis ortodoxa. Sin embargo, recientemente ha tornado a otros pagos. Con voz cristalina salpicada de un dejo alemán, explica por qué cree que los científicos más respetados han pasado dos decenios puliendo una teoría errónea sobre el cáncer.

Es una afirmación sorprendente para tratarse de un científico que aisló de un virus el primer gen causante del cáncer a los 33 años, sacó una plaza en la Universidad de California en Berkeley a los 36 y fue invitado a entrar en la exclusiva Academia Nacional de Ciencias a los 49. Muchos de sus colegas de aquellos tempranos denuedos por cartografiar la estructura genética de los retrovirus ocupan ahora la cúspide de la especialidad. Robert A. Weinberg dispone de un suntuoso laboratorio en el Instituto de Biología Whitehead de Cambridge (Massachusetts), con 20 investigadores a su cargo, un presupuesto de varios millones de dólares y una Medalla Nacional de Ciencias que colgar en su despacho. David Baltimore obtuvo un premio Nobel y ahora preside el Instituto de Tecnología de California.

"Yo hubiera podido seguir y llevarme la gloria del triunfo precoz", dice Duesberg, y quizá no le falte razón. Pero rompió filas e hirió susceptibilidades. Y así, 10 días antes de asistir a este excéntrico simposio tuvo que garabatear una carta desesperada a Abraham Katz, uno de los escasos filántropos adinerados que constituyen su única fuente de financiación desde que se le cerraran todos los canales habituales hace cinco años.

"Sólo nos quedan 45.000 dólares", me confiesa sombrío este rebelde de 64 años, en el oscuro patio del palacete. Katz, que tiene a su mujer enferma de leucemia, es su última esperanza; si este proyecto no sale, Duesberg deberá desprenderse de sus dos asistentes, cerrar su laboratorio en Berkeley y trasladarse a Alemania. Allí fue donde nació —su padre y su madre eran médicos los dos—, donde penó para obtener su doctorado en química y donde dice que todavía le queda una invitación abierta para enseñar en la Universidad de Heidelberg.

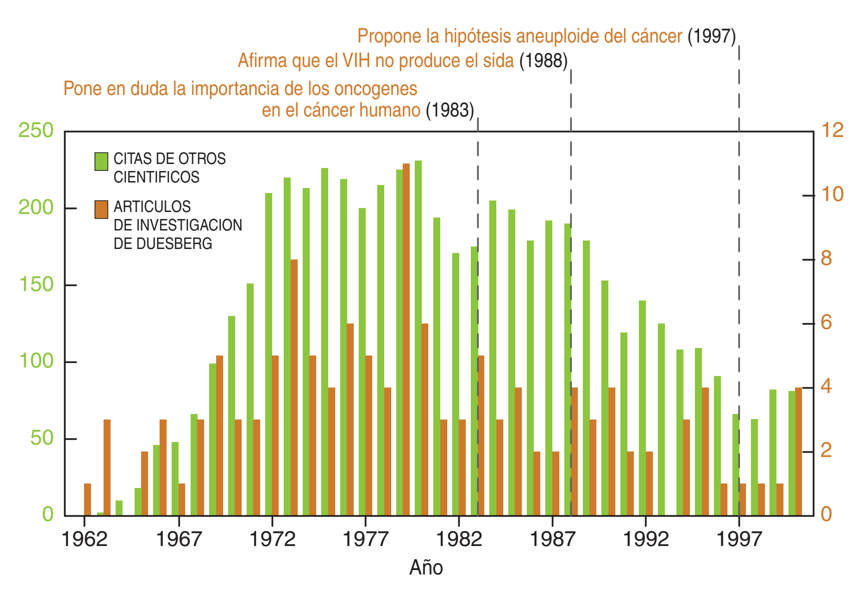
Abandonar los Estados Unidos, si así acabara ocurriendo, cerraría el círculo de una trayectoria que parece una montaña rusa. Aunque su ascenso está bien claro, sería difícil decir exactamente dónde comenzó su caída en desgracia. Semanas más tarde, hablando en su pequeño laboratorio (la quinta parte del tamaño de los locales que tenía en otra época) me pasa un artículo que publicó en 1983. "Con lo que ahí cuento empieza la historia."



1. El virólogo Peter H. Duesberg ha acabado siendo excomulgado de la ortodoxia científica por poner en tela de juicio la teoría del VIH. Ahora afirma que la ciencia se equivoca totalmente con el cáncer

El artículo no es, como me esperaba, el controvertido escrito de 1988 aparecido en *Science*, provocativamente titulado "El VIH no es la causa del sida". Ni uno de las docenas de artículos y cartas que ha publicado en revistas de primer rango en los 10 años siguientes argumentando que el vínculo entre el VIH y el sida es un espejismo, una entelequia de epidemiología chapucera que ha introducido en el mismo saco diferentes enfermedades con causas dispares simplemente porque los afectados han sido expuestos a lo que él llama "un virus pasajero inofensivo".

Aunque estas teorías discrepantes del sida no se originaron con Duesberg, él se convirtió en su paladín y, con ello, en blanco de las mofas de quienes temían que el desacuerdo entre los científicos desconcertaría al público y pondría en peligro su salud. Cuando Mbeki, tras consultar con Duesberg y otros expertos del sida, informó a la Conferencia Internacional del sida que pensaba que "no podemos echar la culpa de todo a un único virus", más de 5000 científicos y médicos sintieron la necesidad de firmar la Declaración de Durban, afirmando devotamente su creencia de que el VIH es la única verdadera causa del sida.



2. La trayectoria de Peter H. Duesberg se refleja en su notable productividad y las veces que otros científicos han citado su trabajo

Las razones de Duesberg convencieron sólo a una exigua minoría de científicos. Su tesis: los diversos trastornos del sida son el resultado del consumo durante largo tiempo de drogas y de fármacos anti-VIH, tales como el AZT, que se prescribe para prevenir o tratar el sida. O, tal como expresó más francamente en Milán, en los países ricos los pacientes con VIH mueren a causa de la toxicidad de los fármacos mismos que se les prescribe para salvarlos.

Aunque lo que él postula no ha recibido ninguna demostración directa, Duesberg sostiene que podría recabarse éticamente comparando 3000 reclutas del ejército seropositivos con otros 3000 reclutas seronegativos, sometidos a los mismos patrones de enfermedades y uso de drogas. Y así murió su idea, como la mayoría de las teorías erróneas, nunca refutada de plano pero sí replicada, en este caso por un tratado de 40 páginas del Instituto Nacional de Enfermedades Alérgicas e Inmunitarias.

Duesberg desconocía la existencia del sida cuando en 1983 escribió el artículo que le valió el estigma de elemento perturbador. Nada dejaba adivinar el título: "¿Genes que transforman los retrovirus en las células normales?". Pero en los escritos de Duesberg los signos de interrogación señalan con frecuencia que ataca por el flanco débil de una teoría comúnmente aceptada; aquí, la teoría oncogénica.

Había intervenido en la demostración de que, cuando ciertos retrovirus introducen sus genes en las células de ratones, las células se vuelven malignas. Weinberg, Baltimore y otros especialistas especularon que quizá genes similares, a los que llamaron "proto-oncogenes", se encuentren latentes en el genoma humano, como bombas de relojería que se activan sólo si una mutación al azar pulsa algún tipo de interruptor genético. Esta hipótesis engendró toda una afanosa búsqueda de oncogenes, de genes supresores de tumores y, recientemente, de genes que "predisponen" al cáncer.

A lo largo de los dos decenios subsiguientes fueron descubriéndose genes humanos con secuencias similares a los oncogenes víricos. Se consolidó esa interpretación del origen del cáncer. "Si se encuestara a los investigadores, un 95 por ciento responderían que la acumulación de mutaciones (en genes clave) produce cáncer", opina Cristoph Lengauer, oncólogo de la Universidad Johns Hopkins.

Pero la trama también se fue haciendo progresivamente más complicada y —para Duesberg— menos convincente. Los científicos esperaban hallar alguna combinación de oncogenes y de genes supresores de tumores que siempre mutaran, al menos en algunas formas de cáncer. No hubo tal. Los supuestos genes del cáncer se cuentan por docenas, los experimentos revelan que, a menudo, células de la misma malignidad diferentes presentan mutaciones distintas; falta un patrón coherente que vincule genes a cáncer. Las células extraídas de tumores de los pacientes traducen típicamente sus genes mutantes en un mero goteo de proteínas, en contraste con el flujo de proteínas mutadas que se producen con profusión en las células transformadas por un virus.

A partir de su artículo de 1983, Duesberg también se ensañó con algunas debilidades de la doctrina ortodoxa. Algunos tumores son causados por el amianto y otros carcinógenos químicamente incapaces de mutar genes específicos, señala. Los ratones que carecen —por ingeniería genética— de genes supresores de tumores y concebidos para expresar con exube-

rancia los oncogenes deberían desarrollar cáncer en su infancia, pero no es así. En un artículo del año pasado, Duesberg calculó que, dada la tasa medida de mutaciones espontáneas y el número de células del cuerpo humano, una persona debería albergar en promedio unas 100.000 células cancerosas con sólo un oncogén dominante que existiera en su genoma. Pero si se requirieran mutaciones simultáneas en tres genes, entonces sólo una de cada cien mil millones de personas padecería alguna vez de cáncer.

En 1997 publicó lo que creía que era una mejor hipótesis. Existe una característica común de casi todos los tumores malignos: las células afectadas poseen cromosomas anómalos. En los cánceres avanzados abundan las células con el doble o el triple de la dotación normal de 46 cromosomas. En los tumores incipientes el número total puede ser normal, pero un examen atento revela usualmente que algunas partes de los cromosomas están duplicadas y alojadas en puntos insólitos.

Theodor Boveri reconoció ya, hace casi un siglo, tal aneuploidia de las células cancerosas. Sugirió que en ello podría radicar la causa del cáncer. Pero la idea perdió fuerza a medida que resultaba infructuosa la búsqueda de un patrón particular de aneuploidía que se correlacionara con la malignidad, salvo en la leucemia mielogénica crónica, que no es un verdadero cáncer porque no se extiende de la sangre a otros tejidos.

Recientemente, sin embargo, Duesberg y otros acometieron un rastreo más exhaustivo de la aneuploidía. Afirman que podría aclarar muchos de los misterios del cáncer y mejor que la teoría actual. Su razonamiento arranca en el momento en que un carcinógeno se entromete en una célula en división, obligándole a producir células hijas con un desequilibrio en los cromosomas. Estas células aneuploides mueren por lo general a causa de su propia aberración. Ahora bien, si el daño es nimio, sobrevivirán, aunque genéticamente inestables; ello significa que los cromosomas sufrirán cambios ulteriores en la siguiente división celular. Las células de los tumores muestran mutaciones múltiples en genes y cromosomas.

Cada cromosoma alberga miles de genes. Por tanto, la aneuploidía creará en la célula un caos genético de enormes proporciones. "La célula se convierte en una especie totalmente nueva en sí misma", resume Duesberg. Le parece altamente improbable que a la nueva "especie" de célula, sea la que fuere, le vaya mejor en el organismo que a una célula humana nativa, y eso puede explicar por qué los tumores tardan tanto en desarrollarse, incluso tras una intensa exposición a un carcinógeno. Las células aneuploides deben sufrir muchas divisiones, evolucionando en cada una, antes de dar con una combinación que pueda prosperar sin control en cualquier lugar del cuerpo.

Hasta el momento, sólo dispone de pruebas experimentales dispersas que respalden su hipótesis. En 1998 demostró que existe una probabilidad de un medio de que una célula humana cancerosa aneuploide gane o pierda un cromosoma cada vez que se divide. El pasado mes de diciembre comunicó que las células aneuploides de los hámster desarrollan rápidamente resistencia contra numerosos fármacos (sello característico del cáncer), mientras que las células normales del mismo cultivo no lo hacían.

Pero no resulta fácil realizar experimentos cuando le han rechazado todos y cada uno de los 22 proyectos presentados ante los organismos públicos para recabar la oportuna financiación. "Es deprimente que incluso las fundaciones privadas se nieguen a patrocinar una investigación de alto riesgo pero con grandes beneficios potenciales", se queja con irreprimible amargura. Por fortuna para él, Abraham Katz le ha concedido una subvención de 100.000 dólares, suficiente para mantener el laboratorio en funcionamiento otros nueve meses.



3. La aneuploidía, observada en los cromosomas aberrantes de esta célula de un cáncer de mama analizada por el grupo de Robert A. Weinberg, del Instituto Whitehead, es tan habitual en el cáncer, que debe ser su causa, afirma Duesberg. Una célula normal de hembra posee dos copias exactas de cada cromosoma (excepto del Y), dando un total de 23 pares. La célula cancerosa contenía tres o más copias, así como cromosomas con porciones traspuestas (como el 1, el 6 y el 22) o segmentos perdidos (el 1, el 3 y el 13)

No parece probable que nueve meses sean suficientes para persuadir a otros investigadores para que se tomen en serio su hipótesis de la aneuploidía. Pero es posible. Numerosos artículos en revistas especializadas han señalado este año la importancia de la "inestabilidad cromosómica" —lo mismo, dicho con otras palabras— en la formación del cáncer. Lengauer y Bert Vogelstein, también éste de la Johns Hopkins, han promovido con particular celo la idea de que la aneuploidía —para Lengauer, una consecuencia de la mutación de los genes— debe ser un paso necesario para la progresión de cualquier tumor.

¿Va a deponer Duesberg las armas y aceptar las reglas de la disciplinada sociedad científica? Reconoce que su postura combativa en el debate del VIH ha podido parecer arrogante. "Con el sida, en parte me lo he ganado. En aquel momento, me creía invulnerable." La experiencia puede haber moderado su carácter, aunque el premio Nobel sale a relucir cuatro veces en tres horas de conversación. Recela. "Cuando se está fuera de la ortodoxia —apostilla— nadie te echa una mano."

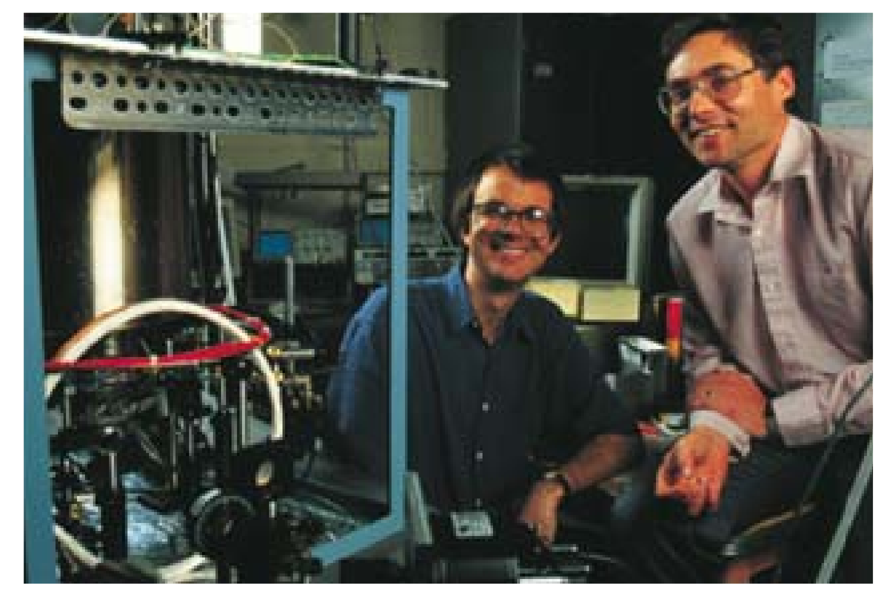
Nobel de Física

Condensado de Bose-Einstein

El premio Nobel de Física de este año se ha concedido a Eric A. Cornell, Wolfang Ketterle y Carl E. Wieman, "por haber conseguido la condensación de Bose-Einstein en gases diluidos de átomos alcalinos y por estudios fundamentales preliminares de las propiedades de los condensados". ¿Cuál es la importancia y alcance de este descubrimiento?

A principios del siglo XX se halló que el comportamiento de la materia a escalas muy pequeñas no se ajustaba a las leyes tradicionales de la física. Así, cuando se mira lo que pasa a distancias de la milésima parte de la milésima parte de un milímetro, se observan cosas que desafían no ya las leyes de la física newtoniana, sino incluso el sentido común. Podemos encontrar partículas que se comportan como ondas, ondas que se comportan como partículas, partículas que son capaces de pasar a la vez por dos agujeros distintos y distantes, o que pueden desaparecer de un sitio para aparecer en otro punto distante (teletransportación), etc. Las leyes que describen el comportamiento de la materia a tales distancias pertenecen a la mecánica cuántica. Parafraseando a Richard Feynman, "la mecánica cuántica se aprende, pero no se comprende".

El que la mecánica cuántica sea aplicable a escalas pequeñas no quiere decir que no tenga repercusiones en el mundo que nos rodea. No estoy hablando solamente de cuestiones técnicas tales como los láseres o los microprocesadores, cuyo descubrimiento y desarrollo le debe mucho a la capacidad de predicción que hemos desarrollado utilizando las leyes de la mecánica cuántica, sino a cuestiones más mundanas; por ejemplo, ¿por qué las cosas tienen el color que tienen?, ¿por qué al tocar un trozo de madera y uno de metal a la misma temperatura, el metal me parece más frío?, ¿por qué la aguja de una brújula está hecha de hierro y no funcionaría sí fuera de aluminio? Son preguntas cuya respuesta última se basa en las leyes de la mecánica cuántica.



Eric A. Cornell (izquierda) *y Carl E. Wieman* (derecha)

Una de las predicciones de la mecánica cuántica es que todas las partículas microscópicas del universo, todos los átomos, todos los electrones, todos los protones, se agrupan en dos grandes familias a las que se les ha dado el nombre de bosones y fermiones en honor de sus descubridores, Satyendra Bose y Enrico Fermi. ¿Cómo se distinguen los bosones de los fermiones? Hay propiedades de la partícula individual que permiten saber si estamos frente a un bosón o a un fermión, pero la diferencia más notable está en su comportamiento colectivo, cuando hay muchos de ellos juntos. Simplificando: a los fermiones no les gusta ser iguales, mientras que a los bosones les encanta actuar de la misma manera.

Para entender este comportamiento de bosones y fermiones, permítaseme una comparación algo frívola. Como todas las comparaciones es incompleta y parcialmente inexacta, pero puede ayudarnos a entender lo que ocurre. Imagínense que hay un grupo de personas que asisten a un concierto en un auditorio. El solista interpreta una partita para violín de Bach y a todos les gustaría estar lo más cerca posible del intérprete. Antes de empezar el concierto, todo el mundo tiene muchas ganas de hablar, moverse por el bar y pocas personas están sentadas. A medida que se aproxima el momento del concierto, la gente va perdiendo su energía, bajan el nivel de la voz y se acomodan en los asientos. Como todos se quieren sentar tan cerca como sea posible del solista (y las entradas no están numeradas), el primero en llegar se sienta en la silla más cercana, el segundo en la siguiente silla más cercana, y así sucesivamente. Este comportamiento humano es típico de los fermiones. Los bosones, por otra parte, se comportan de una manera más peculiar. Cuando el segundo ve que la silla favorita ya está ocupada, no se conforma y en vez de

irse a la siguiente silla, se acomoda en la silla favorita, encima de la persona que ya la ocupa. Una situación que a los bosones parece no importarles. De hecho, el tercero también se sienta en la misma silla, hasta que llega un momento en que una fracción muy elevada de los bosones se encuentran en esa silla favorita. En mecánica cuántica, las sillas son los estados cuánticos y la más cercana al intérprete, el estado fundamental. En breve, al disminuir su energía, los bosones tienden a ocupar el estado cuántico fundamental.

Lo más sorprendente es que, cuando los bosones ocupan el estado fundamental, se comportan todos de la misma manera. Es como si todo el auditorio que se ha sentado en la misma silla, la más cercana al intérprete, abriera y cerrara los ojos al mismo tiempo, tosieran todos al unísono y aplaudieran con una simultaneidad perfecta. En términos mecánico-cuánticos, los bosones han experimentado un cambio de estado para formar un condensado. Pues bien, este condensado de bosones es lo que han encontrado los investigadores, justos merecedores del premio Nobel de este año.

Cornell y Wieman lograron en 1995 formar condensados de unos dos mil átomos de rubidio. Pocos meses más tarde, Wolfang Ketterle formó condensados mucho mayores, con centenares de miles de átomos de sodio.

¿Por qué este descubrimiento merece el premio Nobel? Al fin y al cabo la existencia teórica de bosones y las características de su conducta peculiar se conocían desde 1924, año en que Bose y Albert Einstein hicieron los cálculos pertinentes utilizando las entonces nacientes leyes de la mecánica cuántica. El mérito de los investigadores galardonados consiste precisamente en que han obtenido en el laboratorio lo que había sido predicho en el papel y que nadie había conseguido todavía en los setenta años desde su predicción. ¿Y dónde radicaba la dificultad? En el ejemplo del concierto, la condensación sólo se produce cuando el movimiento, la energía, de las personas ha disminuido lo suficiente y se disponen a acomodarse para escuchar. De la misma manera, para conseguir un condensado hay que quitarles energía a los bosones. La energía se reduce enfriando a bajas temperaturas. Las temperaturas necesarias para conseguir el condensado de Bose en los átomos de rubidio y sodio mencionados son tan bajas, que sólo se alcanzan mediante técnicas de enfriamiento muy depuradas, utilizando, entre otras cosas, haces de luz láser para detener el movimiento de los bosones.

Las técnicas de enfriamiento necesarias fueron desarrolladas por S. Chu, C. Cohen-Tannoudji y W. D. Phillips, a quienes les otorgaron el premio Nobel de física en el año 1997. Las temperaturas requeridas son de una milésima parte de una milésima parte de una milésima parte de un grado centígrado por encima de la temperatura más baja posible, el cero absoluto de temperatura. Ni siquiera en el espacio interestelar tenemos unas temperaturas tan bajas.

Existen otras manifestaciones indirectas de la condensación de bosones que son apreciables a temperaturas bajas, pero no tanto, digamos a unas pocas decenas de grados por encima del cero absoluto. La superconductividad, o cese completo de la resistencia al paso de una corriente eléctrica, tiene también su origen en un fenómeno de condensación de bosones. Sin embargo, en este sistema el fenómeno puro de la condensación de bosones aparece modificado por la presencia simultánea de otros efectos que desfiguran las propiedades esperadas de un condensado "puro" como el que han encontrado los galardonados.

El descubrimiento del condensado de bosones representó una auténtica revolución en la comunidad científica. El encontrar una nueva manera de existir de la materia abre las puertas para buscar nuevos comportamientos todavía insospechados. Es muy pronto para hablar de aplicaciones, pero tenemos motivos para creer que el condensado de bosones puede representar un gran avance tal y como lo fue el láser en su tiempo. Al fin y al cabo, un láser tiene la utilidad que tiene porque las partículas de luz que lo componen actúan mayoritariamente de manera coordinada, lo que da a la luz láser su potencia y precisión. Un condensado de bosones podría comportarse como un láser atómico, como un grupo de átomos que actuarían como si fuesen uno solo. Eso podría incrementar de manera espectacular la precisión de algunas operaciones, tales como medidas de alta precisión, nanotécnica o litografía. Imagínense la precisión que podría alcanzarse en el diseño de microprocesadores si empleáramos por lápiz un chorro de partículas que forman un condensado de bosones, con una potencia suficiente para dibujar el circuito impreso requerido y con una finura extrema en el trazado de las líneas. Estamos en el comienzo de una nueva técnica y sólo podemos empezar a intuir sus aplicaciones.

RAÚL TORAL
Catedrático de Física
de la Materia Condensada
Instituto Mediterráneo
de Estudios Avanzados (IMEDEA)
Universidad de las Islas Baleares
(CSIC)
Palma de Mallorca

Pino canario

Ejemplo de adaptación

El pino canario (*Pinus canariensis* Chr. Sm. ex Dc) es especie endémica del archipiélago atlántico. Su área natural de distribución está restringida a las islas más altas. En Tenerife crece espontáneamente desde el nivel del mar hasta los 2200 m de altitud. Debe tamaña adaptación, entre otros factores, a modulaciones en el contenido en pigmentos fotosintéticos y en sustancias antioxidantes de sus acículas para hacer frente a las condiciones fotooxidantes provocadas por un exceso de radiación y la presencia de contaminantes.

Con la altitud el clima se hace más severo, las temperaturas son más extremas y los vegetales quedan expuestos a mayor radiación.

Cuando las clorofilas —pigmentos fotosintéticos— se muestran ya incapaces de procesar, a través de la fotosíntesis, la energía que absorben, se desencadenan reacciones oxidativas en los centros de reacción del aparato fotosintético que pueden reducir la fotosíntesis (fotoinhibición) o producir, en casos extremos, la destrucción de los pigmentos fotosintéticos (fotooxidación).

Además, con la altitud aumentan los niveles de contaminantes fotooxidativos del aire, principalmente de ozono (O_3). Igual que el dióxido de azufre (SO_2), el O_3 crea aniones superóxidos (O_2^-) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2), moléculas muy agresivas que pueden reaccionar entre sí en las membranas vegetales, en presencia de iones metálicos, formando radicales hidroxilo (OH); radicales que son la causa de peroxidación lipídica, desnaturalización de proteínas e incluso mutaciones del ADN.



Vista del pinar con el mar al fondo y un ejemplar de Pinus canariensis

Las plantas evitan absorber la energía en exceso mediante diversas estrategias. Unas colocan las hojas en posiciones que impidan la incidencia directa de los rayos del sol, otras desarrollan un sistema de pelos epidérmicos con una gran capacidad de reflexión. A esas y otras adaptaciones morfológicas, hemos de agregar los mecanismos metabólicos desarrollados para hacer frente a este estrés fotooxidativo; consisten, sobre todo, en reducir y modular los contenidos en clorofilas.

No obstante, todavía podría haber un exceso de energía absorbida, con la formación consiguiente de especies de oxígeno reactivas. El exceso de energía en las clorofilas puede disiparse directamente, en forma de calor, por medio de los carotenoides; las especies activadas de oxígeno pueden eliminarse mediante un sistema de sustancias antioxidantes (ascorbato, glutatión y el alfa-tocoferol).

Sólo las plantas que han adquirido alguno de estos mecanismos pueden vivir en zonas de alta montaña. Las especies adaptadas a tales cotas no medran en zonas más bajas, donde las condiciones ambientales son muy diferentes.

Salvo el pino canario. Presenta éste una notable plasticidad que le permite vivir a lo largo de todo el gradiente altitudinal de la isla tinerfeña. Aunque el aspecto de las acículas es similar a lo largo del gradiente, no lo es el contenido en pigmentos fotosintéticos y en compuestos antioxidantes. Así lo han puesto de manifiesto las investigaciones que estamos realizando un grupo de la Universidad de La Laguna y de la Universidad de Graz.

Haciendo un muestreo a lo largo de un perfil altitudinal, encontramos una tendencia a la disminución del contenido en clorofilas y al aumento del de carotenoides, con el consiguiente incremento del valor de la relación carotenoides/clorofilas con la altitud. Además, en las cotas altas las relaciones alfa caroteno/beta caroteno fueron más bajas y los contenidos en ácido ascórbico resultaron significativamente mayores, de lo que se desprendía un incremento en los procesos de oxidación en las membranas tilacoidales. Sin embargo, los niveles del antioxidante glutatión y del alfa-tocoferol no variaron de una manera significativa entre los distintos sitios.

Otros estudios realizados en bosques de coníferas de zonas templadas revelan también una acumulación de antioxidantes con la altitud y una disminución de clorofilas, en algunos casos de una manera más acentuada que en el pino canario. En la isla se enmascara el efecto altitudinal, en cierta proporción, con la existencia de muchos microclimas, provocados por la topografía y por los vientos alisios, que al venir del NE cargados de humedad forman una capa de nubes en elevaciones medias variando su situación altitudinal a lo largo del año. De esta manera es posible que, en algunos sitios, el pino esté sometido a similares factores de estrés que los provocados por la altitud.

Para comprobarlo, se combinaron estas determinaciones con estudios de microscopía electrónica, que no detectaron daños en los cloroplastos de las acículas de ninguno de los sitios, y con medidas de algunos parámetros de fluorescencia de la clorofila.

La relación fluorescencia variable respecto de la máxima (Fv/Fm) guarda correlación con el rendimiento cuántico fotosintético. Las disminuciones en los valores normales (0,85 a 0,75) de esta relación indican daño o alteración en el aparato fotosintético. En todos los sitios estudiados a lo largo del gradiente vertical los valores de dicha relación fueron normales.

En conclusión, mediante modulaciones metabólicas, el pino canario se adapta a vivir en su área natural de distribución sin presentar síntomas severos de estrés.

MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ
y DOMINGO MORALES MÉNDEZ
Dpto. Biología Vegetal,
Universidad de La Laguna,
Tenerife

Enfermedad de Tangier

Base genética

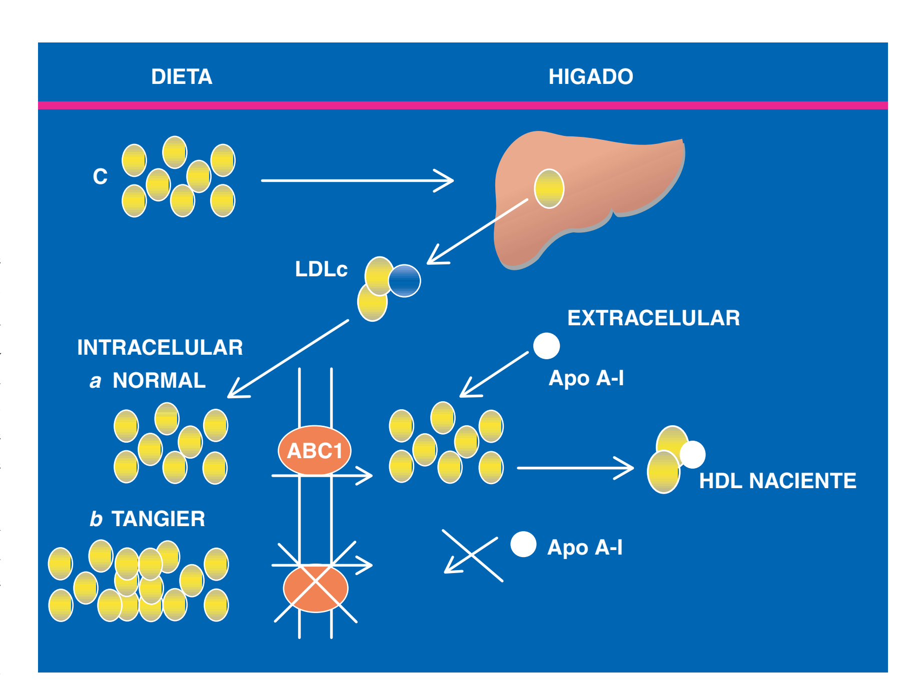
Desde que se descubrió el primer caso de la enfermedad de Tangier en 1960 han aparecido unos 50 casos más, dos de ellos en España. Debe su nombre a la isla (Tangier, Virginia) donde residía el primer afectado, un niño de 5 años que presentaba las amígdalas de color anaranjado y aumentadas de tamaño, junto con síntomas de neuropatía periférica y ausencia en el torrente sanguíneo de colesterol transportado por lipoproteínas de alta densidad (HDL).

Se trata de una enfermedad hereditaria autosómica recesiva. Los pacientes presentan niveles indetectables de HDL colesterol, partícula lipoproteica cuyos bajos niveles plasmáticos se han relacionado con riesgo elevado de cardiopatía isquémica. La alteración más característica de la enfermedad de Tangier es la acumulación de ésteres de colesterol en los macrófagos.

Ante ese cuadro se pensó en una posible alteración en el transporte reverso de colesterol desde los tejidos periféricos hasta el hígado. Según se sabe, las lipoproteínas de baja densidad (LDL) cargan el colesterol en el hígado, donde se sintetiza o se deposita procedente de la dieta, y lo llevan hasta los tejidos periféricos, para su empleo en la síntesis de hormonas esteroideas y de membranas celulares. Desde estos tejidos puede volver al hígado, transportado en forma de HDL colesterol (transporte reverso).

En 1999 tres grupos de investigación liderados por Gerd Assmann, Michael Hayden y Gerd Schmitz hallaron que los sujetos con enfermedad de Tangier presentaban mutaciones en el gen *ABC1* ("ATP-binding-cassette transporter 1"). El *locus* determinante de la patología aparecía en el cromosoma 9q31, donde se alojaba el gen que codifica la proteína ABC1.

Más tarde, se hallaron en ese gen diferentes mutaciones asociadas a la enfermedad; entre ellas, una deleción de una base en el exón 13, una inserción-deleción en el exón 12, una deleción de 2 pares de bases en el exón 22, un homocigoto compuesto que presenta un cambio de C por G en el codón 567 del exón 13 (codón "paro") y una inserción de G en el codón 1035 (exón 22).



El colesterol dietético llega al hígado para su depósito y metabolización (a). *Desde este órgano el colesterol es transportado hacia los tejidos periféricos en forma de LDL colesterol. Se cree que ABC1 transporta el colesterol libre desde el interior celular hacia el espacio extracelular, donde se une a partículas apo A-I para sintetizar la HDL. Cuando se padece la enfermedad de Tangier, alteraciones de la proteína ABC1 impiden la formación de las partículas HDL, acumulándose el colesterol esterificado en el interior celular* (b)

Posteriores estudios han demostrado que la proteína ABC1 desempeña un papel fundamental en el transporte reverso de colesterol no esterificado y de fosfolípidos desde el interior celular hasta la partícula de HDL. Este colesterol no esterificado podría pasar desde la membrana celular hasta una partícula pobre en lípidos de apo A-I, iniciando la síntesis de HDL, molécula que se enriquecería de lípidos polares procedentes del metabolismo de las lipoproteínas ricas en apo B.

Aunque se sabe que la proteína ABC1 consta de 12 dominios de membrana, se ignora todavía su ubicación en la célula. Quizá se aloje en la membrana celular o tal vez en las membranas intracelulares donde ejercería un efecto indirecto sobre el transporte reverso de colesterol.

En sujetos con enfermedad de Tangier, las proteínas ABC1 alteradas por mutaciones impiden la síntesis de HDL. Su metabolismo quedaría así disociado del metabolismo de las partículas ricas en apo B. Si tal fuera el proceso, tendríamos la explicación de los niveles indetectables de HDL colesterol y los bajos niveles de apo A-I y de LDL colesterol, así como los depósitos intracelulares de ésteres de colesterol típicos de los sujetos con esta enfermedad.

Los individuos heterocigotos para mutaciones de ABC1, es decir, los parientes de los afectados por esa enfermedad hereditaria, manifiestan niveles de HDL colesterol reducidos a la mitad de los que se observan en los sujetos normales.

El grupo de Michael Hayden ha demostrado también la existencia de mutaciones en forma heterocigota localizadas en el gen de ABC1 en sujetos con hipoalfalipoproteinemia familiar, enfermedad caracterizada

por bajos niveles de HDL colesterol, pero sin depósitos de ésteres de colesterol en los macrófagos.

La identificación de ABC1 y su relación con el transporte reverso de colesterol abre nuevas expectativas en diferentes campos de investigación, como conocer la regulación de la expresión de esta proteína y las consecuencias farmacológicas de la elevación del HDL colesterol. Téngase presente que la primera causa de morbilidad y mortalidad en los países occidentales es la enfermedad coronaria y que gran parte de los sujetos afectados presentan bajos niveles de HDL colesterol.

JOSÉ T. REAL, JUAN F. ASCASO, RAFAEL CARMENA
Unidad de Lípidos y Arteriosclerosis, Servicio de Endocrinología y Nutrición del Hospital Clínico Universitario de Valencia.
Departamento de Medicina, Universidad de Valencia

Identificación genética de desaparecidos

El programa Fénix

La identificación de las personas ha sido desde siempre una ineludible exigencia social, pero no sólo desde el ámbito del derecho. A menudo se trata de un problema humano, que afecta a las familias y amigos de los desaparecidos.

Cada año se denuncian centenares de desapariciones, muchas de ellas de jóvenes y menores de edad. Paralelamente, en los cementerios españoles se acumulan cientos de restos óseos sin identificar de personas muertas violentamente lejos de su hogar. Gracias a los avances en investigación genética y biología molecular, contamos los forenses con una potente técnica de identificación (el análisis de los polimorfismos del ADN nuclear y mitocondrial).

España ha sido el primer país del mundo en poner en marcha, basándose en las técnicas de análisis del ADN, un complejo sistema de identificación de restos óseos y cadáveres no identificados, en el que colaboran los familiares genéticamente emparentados con las personas desaparecidas. Se trata del Programa Fénix, un proyecto conjunto de la Universidad de Granada y la Dirección General de la Guardia Civil, subvencionado por nueve fundaciones de instituciones financieras e industriales (BBVA, Caja Madrid, Endesa, Juan March, Marcelino Botín, Barrié de la Maza, Ramón Areces, Tabacalera y Telefónica).

Agotadas las vías de identificación tradicionales —examen de las pertenencias personales, estudios antropométricos, análisis odontológicos, radiográficos y otros— se procede a la investigación de las características genéticas de los restos humanos que permanecen anónimos. La prueba del ADN resulta inequívoca, siempre que se disponga de una referencia con la que comparar.

En el curso del trabajo, se crean dos registros independientes. Uno, llamado de los "datos dubitados o cuestionados", contiene ADN de los restos; otro, el de los "datos indubitados o de referencia", incluye ADN de los familiares que han aportado de forma voluntaria una muestra biológica. Se comparan luego ambos registros, para conocer el grado de relación genética.

Con el análisis progresivo de todos los huesos no identificados y de los familiares voluntarios, es de esperar que se completen las dos bases de datos hacia finales del año 2003. Para entonces, se podrá garantizar la identificación de todos los restos óseos cuyos familiares hayan cedido voluntariamente una muestra biológica de referencia. De momento se han producido ya identificaciones positivas, entre ellas las del remero del equipo de la Universidad de Oxford que desapareció en las aguas del río Ebro en Zaragoza, cuyo cadáver fue inmediatamente identificado al compararse con el ADN que la madre cedió al Programa Fénix en España a los pocos días de la desaparición del deportista.



Logotipo/escudo de Fénix

En este año se está procediendo a la expansión internacional del Programa Fénix, y los trágicos atentados de Nueva York y Washington han puesto de actualidad la colaboración que venimos manteniendo en estos temas con otras instituciones norteamericanas.

JOSÉ ANTONIO LORENTE ACOSTA
Director Científico del "Programa FÉNIX"
Facultad de Medicina de la Universidad de Granada

Drosophila melanogaster

Polaridad ocular

El ojo compuesto de los insectos ha llamado desde siempre la atención de los biólogos del desarrollo, atraídos por la regularidad con que las células que lo forman se organizan en el espacio.

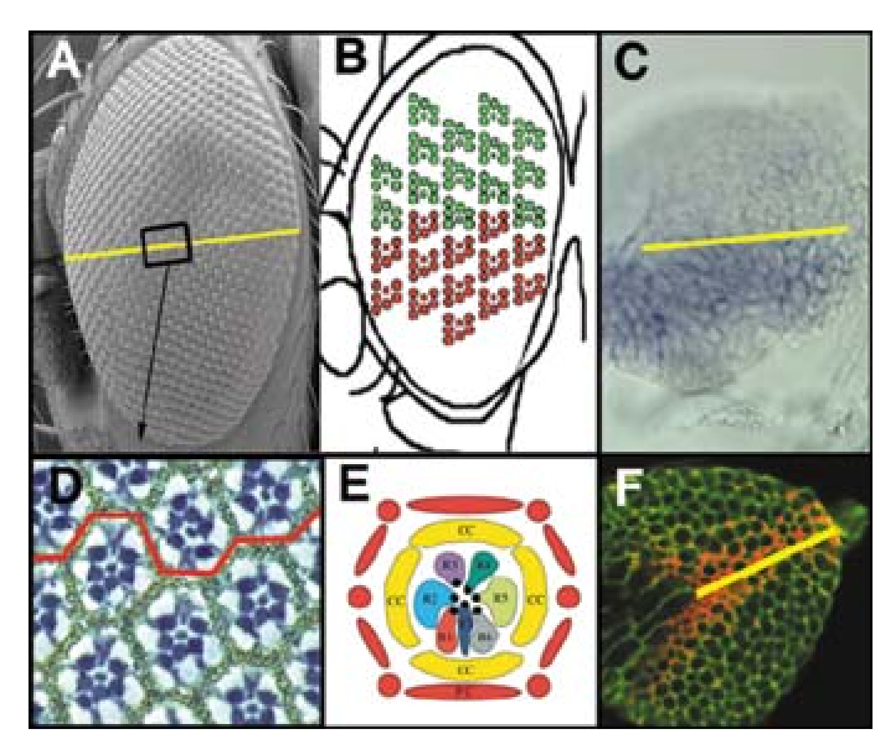
Se funda tal organización en la repetición de una unidad hexagonal, el omatidio, que contiene un número fijo de células fotorreceptoras y auxiliares. Las células fotorreceptoras desarrollan unas vesículas membranosas, los rabdómeros, que actúan como receptores lumínicos.

En la mosca del vinagre *Drosophila melanogaster* y otros dípteros evolucionados, los rabdómeros de las células fotorreceptoras externas (R1-R6) se distribuyen en un trapecio asimétrico. Merced a esa disposición asimétrica, advertimos que el ojo se organiza en torno a un eje dorsoventral, ya que los omatidios situados en su mitad dorsal son imagen especular de los omatidios situados en la mitad ventral. La línea imaginaria que separa los omatidios dorsales de los ventrales se llama ecuador y es un eje de simetría especular.

El ecuador presenta varias características que sugieren que su formación se halla en estrecha relación con el desarrollo y la funcionalidad del ojo. En primer lugar, el ecuador coincide con una restricción del linaje celular entre las mitades dorsal y ventral del ojo. Así, los descendientes de células dorsales y ventrales siempre se localizan en la mitad dorsal o ventral del ojo, respectivamente. Las células del ojo "saben", pues, a qué mitad pertenecen, información que transmiten a sus descendientes. En virtud de esa restricción, el borde que separa las células dorsales y ventrales es fijo y, por tanto, también lo es la posición del ecuador.

En segundo lugar, la primera fila de omatidios que se diferencia cae siempre en la intersección del ecuador con el margen posterior del ojo. Diríase que el ecuador sirve de señal para definir el sitio de iniciación de la diferenciación de los omatidios. Una vez que se ha diferenciado la fila de omatidios posterior, una nueva fila de omatidios aparece, cada 90 minutos, anterior a las ya diferenciadas.

Por último, el ecuador es un eje de simetría. En el ecuador se origina la información necesaria para polarizar los omatidios. Para entender cómo se forma el ojo habrá, pues, que analizar cómo se establece el ecuador y, en particular, cuál es el mecanismo causante de la diferencia entre células dorsales y ventrales del ojo.



Ojo de Drosophila melanogaster *visto al microscopio electrónico. La línea amarilla indica el borde dorso-ventral* (A). *Esquema del ojo que ilustra la polaridad de los omatidios dorsales* (verde) *y ventrales* (rojo) (B). *Expresión en la mitad ventral del disco imaginal de ojo, el epitelio a partir del cual se forma el ojo, del gen fringe* (púrpura) (C). *Sección transversal del ojo en el ecuador* (caja negra en a) (D). *Los rabdómeros de las células fotoreceptoras aparecen en círculos azules. Esquema de las diferentes células que forman un omatidio* (E). *R1-R7: Fotorreceptores con los rabdómeros representados mediante círculos negros; CC: Células de la córnea; PC: Células pigmentarias. Expresión en el borde dorso-ventral* (línea amarilla) *de un gen regulado por Notch* (rojo) *que indica que la activación del receptor está limitada al borde dorsoventral* (F)

Según parece, el ecuador coincide con el lugar donde el receptor de membrana Notch se activa por sus ligandos Delta y Serrate. La activación localizada de Notch en el ecuador está regulada por Fringe, una proteína con homología de secuencia con glicosiltransferasas que se expresa en la mitad ventral del ojo. Fringe regula la interacción entre Notch y sus ligandos, limitando la activación de este receptor al borde de expresión de Fringe.

La expresión del gen *fringe* en el ojo está regulada negativamente por las proteínas del complejo génico Iroquois, factores de transcripción que se expresan en un dominio dorsal complementario al de *fringe*. La expresión de las proteínas Iroquois establece la diferencia entre células dorsales y ventrales, el borde de expresión de *fringe* y, por tanto, el lugar de activación de Notch. De esta manera, la diferencia entre las células dorsales y ventrales se relaciona con la activación localizada de Notch y la formación del ecuador.

Con técnicas genéticas podemos manipular la activación localizada de Notch en el ecuador. De ese modo se ha evidenciado la necesidad de esta activación para promover el crecimiento del ojo, la iniciación de la diferenciación de los omatidios y la determinación de su polaridad.

Habrá ahora que identificar los genes regulados por el receptor Notch durante estos procesos, lo que permitirá desentrañar el mecanismo en cuya virtud las células del borde dorsoventral controlan el crecimiento global del ojo y finalmente cuál es la relación del ecuador con la polarización de los omatidios.

Importa resaltar que la activación localizada del receptor Notch se requiere también para la formación del ala de la mosca y para la segmentación de los somitos en vertebrados. Ello nos indica que este mecanismo persiste y desempeña una función central en el control del crecimiento y la diferenciación celular en distintos organismos.

JOSÉ F. DE CELIS
Centro de Biología Molecular "Severo Ochoa"
Universidad Autónoma de Madrid
MARÍA DOMÍNGUEZ
Instituto de Neurociencias
Universidad Miguel Hernández
Alicante



Texto y fotos: Josep-Maria Gili, Dolors Blasco y Claude Carré

Espuma marina



1. Costa del norte de Namibia, en el parque natural de Squeleton Coast. Allí las aglomeraciones de "espuma marina", producto del crecimiento algal, se observan a lo largo del perímetro costero

La productividad de los sistemas biológicos resulta difícil de observar a simple vista en los ecosistemas marinos. Por contra, en los ecosistemas terrestres nos hacemos una idea inmediata de su rendimiento con sólo mirar la frondosidad y diversidad de las selvas tropicales o fijarse en el rápido crecimiento de las plantas de las praderas o las estepas.

Pero en el medio marino la inaccesibilidad no es sinónimo de inexistencia. Hay zonas marinas de elevada producción. Algunas se dan cerca de la costa. Tal acontece cuando la vemos invadida por una espuma espesa y persistente. A menudo asociada esa estampa a la imagen de ríos contaminados con vertidos tóxicos, la espuma de las fotografías constituye un efecto antagónico al anterior. Se trata de un fenómeno singular de áreas ribereñas muy ricas en nutrientes.

Las concentraciones de espuma responden a densas acumulaciones de fitoplancton, de microalgas. Por una serie de circunstancias éstas se multiplican exponencialmente hasta formar masas espesas. En mar abierto, el crecimiento de las microalgas se diluye en la masa de agua, dilución que evitan las algas cuando las corrientes marinas que se dirigen constantemente hacia la costa las concentran en bahías o calas; al propio tiempo, en esta zona se acumulan nutrientes que utilizan las algas. Añádase una mayor irradiancia solar en aguas superficiales. Todo ello favorece que el crecimiento de las poblaciones, su producción, se concentre en la costa de manera exponencial.

Al crecer, las microalgas excretan sustancias mucilaginosas que, a modo de pegamento, fomentan la compactación de las cadenas de células. Fenómenos como el descrito pueden ocurrir en diferentes zonas costeras de todos los océanos, pero son mucho más frecuentes en áreas de afloramiento.



2. Masa de fitoplancton, o "espuma marina", atrapada en una pequeña cala de la costa de Namibia

3. Masa de fitoplancton en proceso de disolución al cabo de una semana de haberse producido la proliferación algal





4. Visión al microscopio binocular de las cadenas de microalgas (diatomeas) que conformaron las proliferaciones o "espuma marina" de Namibia



5 y 6. Fotografías al microscopio óptico de cadenas de algas del género Chatoceros *que pueden generar proliferaciones algales en el Mediterráneo y Pacífico*



Nanotécnica, la nueva ingeniería

La nanotécnica ha entrado con fuerza en las instituciones académicas. En ella la industria ha puesto ambiciosas esperanzas

Gary Stix

Albert Einstein calculaba, en su tesis doctoral, el tamaño de una molécula de azúcar a partir de datos experimentales sobre la difusión del terrón en el agua. Demostraba así que cada molécula mide alrededor de un nanómetro de diámetro. Esta dimensión, la millonésima parte del milímetro, equivale a la anchura de 10 átomos de hidrógeno yuxtapuestos, un milésimo de la longitud de una bacteria o un millonésimo de una cabeza de alfiler. Precisamente por ello se considera la unidad esencial para la investigación en el asombroso mundo que Einstein intuía hace casi 100 años. A buen seguro, sus tutores le hubieran animado hoy a recorrer la senda de la nanotécnica.

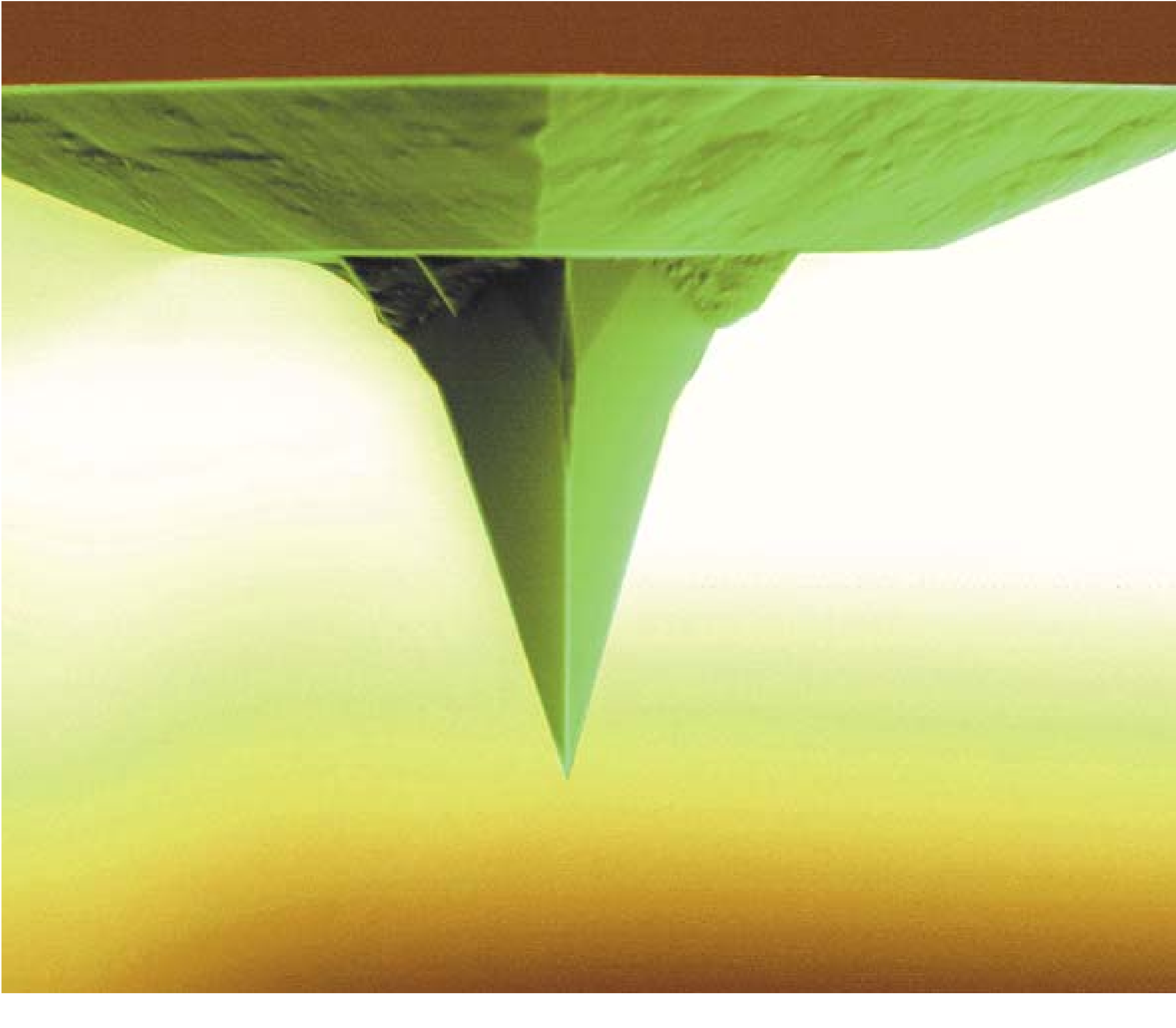
En efecto, esta disciplina recibe una atención y unos recursos sólo superados por los dedicados a la biomedicina y a la defensa. (Todavía se da prioridad a la lucha contra el cáncer y los escudos antimisiles.) Todo su campo es una vasta caja de sorpresas, en la que se crean diminutos objetos que a veces resultan útiles. Se nutre de aportaciones de la física de la materia condensada, la ingeniería, la biología molecular y la química. Hacia su cultivo se han proyectado los físicos de materiales y los profesionales de la química orgánica.

Desde que DuPont acuñó el eslogan de “mejores cosas para vivir mejor por medio de la química”, los que se dedican a manipulación molecular no han ganado tantos adeptos y atraído tanto la atención pública. El reconocimiento oficial ha venido acompañado de mucho dinero, habida cuenta de que no se trata de escudos antimisiles.

La NNI (siglas en inglés de la Iniciativa Nacional de Nanotécnica), anunciada a principios del año pasado por el presidente Clinton, es un programa de múltiples organismos ideado para aportar una gran dotación financiera a la ingeniería nanométrica. La asignación de 76.000 millones de pesetas en el año fiscal que terminó el 30 de septiembre incrementó en el 56 por ciento la del año anterior. La iniciativa está en vías de crecer un 23 por ciento para el año fiscal 2002, aun cuando la administración Bush ha propuesto recortes en la mayoría de los programas de financiación federales que fomentan la investigación y el desarrollo.

Sólo en los Estados Unidos, han aparecido en las universidades más de 30 centros de investigación y grupos interdisciplinarios en nanotécnica; hace dos años su número no llegaba a 10. En los demás países, la inversión total en nanotécnica saltó este año desde 57.000 hasta 150.000 millones de pesetas, según datos de la Fundación Nacional de la Ciencia (NSF).

Al presentar la iniciativa de nanotécnica en su discurso del año pasado, Clinton miró muy lejos, pero se quedó corto en detalles específicos: señaló que algún día se podría almacenar toda la biblioteca del Congreso en un dispositivo del tamaño de un terrón de azúcar o bien producir materiales con resistencia



1. **LA PUNTA DEL MICROSCOPIO DE FUERZA ATOMICA, símbolo de la revolución nanotécnica, se utiliza para sondear y manipular moléculas.**

diez veces superior a la del acero y sólo una fracción de su peso. Pero esto no eran simples lucubraciones de un político visionario.

La definición del dominio es resbaladiza. Algunas nanotécnicas realmente no lo son, puesto que tratan de estructuras de escala micrométrica (millonésimas de metro), mil o más veces mayores que un nanómetro. En muchos casos designa la investigación básica en estructuras que tienen al menos una dimensión de uno a varios cientos de nanómetros. Para mayor confusión, ciertas nanotécnicas se vienen utilizando largo tiempo: durante cien años se han añadido como refuerzo a los neumáticos partículas de carbono de tamaño nanométrico. Por otro lado, el término también podría designar una vacuna, a menudo formada por una o más proteínas de dimensión nanométrica.

El mundo "nano" es una misteriosa zona fronteriza entre el dominio de las moléculas y los átomos (regido por la mecánica cuántica) y el mundo "macro", en el que las propiedades globales de los materiales resultan del comportamiento colectivo de billones de átomos, ya sea el material una viga de acero o la crema que rellena un pastel. En el extremo inferior, en la región del nanómetro, nos estrellamos contra los bloques básicos constitutivos de la materia. Estas son estructuras naturales mínimas que imponen un estricto límite a la miniaturización: es imposible fabricar nada de menor tamaño.

La naturaleza crea nanoestructuras desde hace miles de millones de años. Pero Mihail Roco, el experto de la NSF que supervisa la iniciativa nanotécnica, ofrece una definición más restrictiva. El incipiente

Macro, micro, nano

La pequeñez del nanómetro se aprecia en sucesivas ampliaciones fotográficas por potencias de 10, desde el dorso de una mano (10 centímetros) hasta los bloques



De *Potencias de diez*, de Philip y Philys Morrison y la oficina de Charles y Ray Eames.

campo —comparación de la nanotécnica nueva y la antigua— trata de materiales y sistemas que tienen como propiedades esenciales: al menos una dimensión comprendida entre uno y 100 nanómetros, procesos de diseño caracterizados por un control fundamental sobre los atributos físicos y químicos de las estructuras a escala molecular, y posibilidad de combinarse para formar estructuras mayores. El interés por el uso de nanoestructuras deriva de la idea de que éstas pueden —al menos en teoría— ofrecer superiores propiedades eléctricas, químicas, mecánicas u ópticas.

Por supuesto que las magnitudes nanométricas, según la definición de Roco, tienen existencia real. Intercalando entre capas magnéticas varias capas no magnéticas, una de ellas de menos de un nanómetro de espesor, pueden obtenerse sensores para unidades de disco con sensibilidad muchas veces superior a la de dispositivos anteriores, lo que permite almacenar más bits en la superficie de cada disco. Desde su primera introducción en 1997, estas cabezas magnetorresistivas gigantes han dado origen a una industria de almacenamiento muy rentable.

La nueva era nanométrica viene anunciada por herramientas capaces de formar imágenes de moléculas y átomos individuales y de manipularlas. Símbolos de esta revolución son los microscopios de barrido electrónico —el microscopio de efecto túnel y el microscopio de fuerza atómica, entre otros—, que crean imágenes de átomos individuales o los trasladan de un lugar a otro. El Laboratorio de Investigación de IBM en Zurich ha llegado a colocar las afiladas puntas de tamaño nanométrico que utilizan los microscopios de fuerzas sobre los terminales salientes (en número mayor de 1000) de una microplaqueta. Las puntas del dispositivo Millipede pueden grabar bits digitales en una lámina de polímero. Con esta técnica podría conseguirse un dispositivo almacenador de 20 o más veces la densidad de los mejores controladores de disco actuales.

En este entorno han aparecido diferentes modos de abordar la fabricación de nanoestructuras. Se puede trabajar en sentido descendente (de arriba abajo), desprendiendo o añadiendo material a una superficie para darle forma. Los microchips, que ahora exhiben pistas de circuito de muy poco más de 100 nanómetros, van a convertirse en el ejemplo más destacado. Por el contrario, se puede partir desde el nivel más elemental (sentido ascendente, de abajo arriba), desde átomos o moléculas que se ordenan espontáneamente cuando las condiciones son apropiadas, hasta estructuras más complejas conseguidas a través de procesos de autoensamblaje. Los nanotubos —cilindros de grafito con insólitas propiedades eléctricas— son un buen ejemplo de nanoestructuras autoensambladas.

Más allá del silicio

La miniaturización de los circuitos en los microchips electrónicos es una de las razones principales del interés por la nanotécnica. Las grandes compañías investigadoras en informática, como IBM y

Hewlett-Packard, han establecido programas importantes. Cuando se deseche la electrónica de silicio al uso —quizá dentro de 10 a 25 años—, podrían ocupar su lugar las nuevas técnicas nanoelectrónicas. Pero esto no puede asegurarse. Nadie sabe si la electrónica de fabricación mediante nanotubos o cualquier otro material nuevo permitirá mejorar definitivamente las prestaciones de los microcircuitos sin la correspondiente elevación de coste que caracteriza la producción de chips de silicio.

Aunque los transistores de escala molecular del Pentium XXV no devoren ceros y unos, la electrónica modelada por nanotécnica podría introducirse en dispositivos que nos revelen los secretos de la máquina viva más elemental, la célula. De hecho, lo bionano encuentra aplicaciones reales aun antes de que aparezcan los nanocomputadores de la era postsilicio. Para detectar la actividad celular se necesitan pocos marcadores de escala nanométrica, constituidos por un material semiconductor, frente a los billones de transistores que han de funcionar conjuntamente en un nanocomputador. Existe ya una empresa, la Quantum Dot Corporation, que va a utilizar los puntos cuánticos de semiconductores como etiquetas en experimentos biológicos, investigación de nuevos fármacos y pruebas diagnósticas, entre otras aplicaciones.

A extramuros de la biología, la primera oleada de productos utiliza nanopartículas para mejorar propiedades básicas de los materiales. Como ejemplo, Nanophase Technologies, una de las pocas empresas comerciales del sector, produce partículas de óxido de zinc a escala nanométrica para uso en cremas de protección solar, puesto que las partículas no dispersan la luz visible y tornan transparentes las cremas usualmente blancas.

La iniciativa estatal norteamericana sobre nanotécnica va mucho más allá de las cremas solares. Se pretende que los materiales nanoestructurados ayuden a reducir el tamaño, el peso y la potencia de las aeronaves, a crear procesos de fabricación ecológicos con mínimas emisiones de productos no deseados y a formar la base de plaguicidas biodegradables. Un campo tan amplio —y una investigación básica todavía tan nueva en algunas subespecialidades— hacen dudar de su eficacia para alcanzar ambiciosos objetivos técnicos que quizás estén a 20 años de distancia.

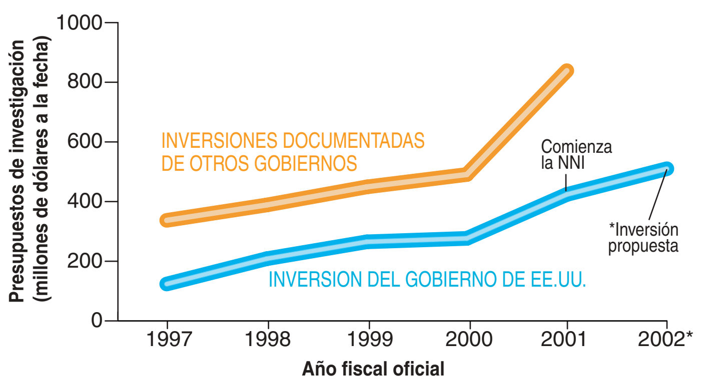
Nanosueños

Toda investigación avanzada comporta riesgos. Sobre todo, la nanotécnica. Su cuota de respetabilidad se ve teñida por la asociación del término con toda una cábala de futurólogos que predicen la apertura de una senda nano hacia la utopía técnica: prosperidad inigualable e industria no contaminante.

En 1986 —cinco años después de que Gerd Binnig y Heinrich Rohrer de IBM inventaran el microscopio de efecto túnel, por el que recibieron el premio Nobel— el libro *Engines of Creation* de K. Eric Drexler causó cierto revuelo al presentar un control de la materia casi mágico. En la obra se describen nanomáquinas autorreplicantes capaces de producir prácticamente cualquier bien material, a la par que invierten el calentamiento global, curan las epidemias y prolongan la duración de la vida. Los científicos ridiculizaron estas predicciones, advirtiendo que su inviabilidad esencial las convertía en absurdas representaciones de lo que encierra el futuro.

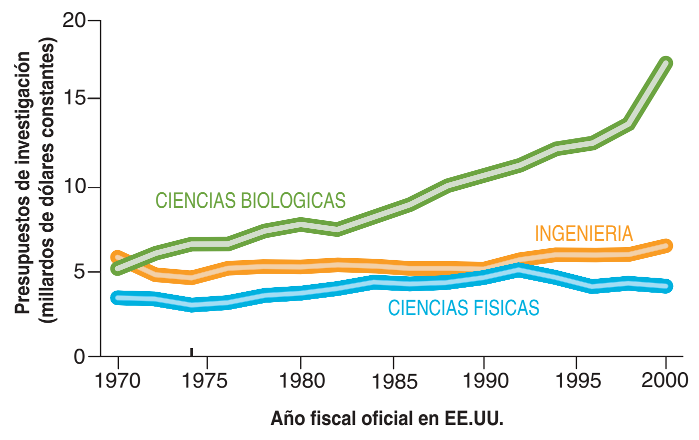
Mas para muchos ajenos a la ciencia, las profecías de Drexler obligaban a cabalgar sobre la frontera entre ciencia y fantasía. Hablar de máquinas regeneradoras de células que suprimirían el envejecimiento tal como lo conocemos y de aparatos domésticos que producirían alimentos sin matar ningún ser vivo, ayudó a crear una fascinación por lo pequeño que los científicos aprovecharían luego para llamar la atención hacia su trabajo en proyectos más comunes

FINANCIACION EN NANOTECNICA



FUENTES: Informe del Senado sobre nanotécnica, 24 de mayo de 2001 y Fundación Nacional de las Ciencias

TENDENCIAS DE INVESTIGACION FEDERAL EN MATERIAS ESCOGIDAS



FUENTE: Fundación Nacional de las Ciencias

2. LA INICIATIVA NACIONAL DE NANOTECNICA (NNI) ayuda, desde el año fiscal 2001, a mantener competitivas las inversiones de EE.UU. respecto de las mundiales (*arriba*). Su aportación monetaria a las ciencias físicas y la ingeniería tiende a compensar su menor financiación frente a las ciencias biológicas (*abajo*).

Jalones hacia la nanoescala

Hace 3500 millones de años. Aparecen las primeras células. Encierran mecanismos nanométricos que manipulan el material genético y suministran energía.
400 a.C. Demócrito acuña el término “átomo”, que significa “indivisible” en griego clásico.
1905. Albert Einstein publica un trabajo en el que estima en un nanómetro el tamaño de una molécula de azúcar.
1931. Max Knoll y Ernst Ruska desarrollan el microscopio electrónico, que toma imágenes subnanométricas.
1959. Richard Feynman da su famosa conferencia “Queda mucho sitio por debajo” (“There’s Plenty of Room at the Bottom”) sobre el porvenir de la miniaturización.
1968. Alfred Cho y John Arthur con sus colegas de los Laboratorios Bell inventan la epitaxia de haz molecular, técnica para depositar capas atómicas individuales en una superficie.
1974. Norio Taniguchi idea el término “nanotécnica” para designar procesos mecánicos de tolerancias inferiores a un micrometro.
1981. Gerd Binnig y Heinrich Rohrer crean el microscopio de efecto túnel, capaz de tomar imágenes de átomos individuales.
1985. Robert Curl, Harold Kroto y Richard Smalley descubren los buckminsterfullerenos, también llamados “buckybolas”, de diámetro aproximado a un nanómetro.
1986. K. Eric Drexler publica *Engines of Creation*.
1989. Donald Eigler, de IBM, escribe las letras del nombre de su compañía utilizando átomos individuales de xenón.
1991. Sumio Iijima, de NEC, en Tsukuba, descubre los nanotubos de carbono.
1993. Warren Robinet, de la Universidad de Carolina del Norte, y Stanley Williams, de la Universidad de California en Los Angeles, idean un sistema de realidad virtual conectado a un microscopio de efecto túnel tal, que el usuario puede ver y tocar los átomos.
1998. El grupo de Cees Dekker, de la Universidad Politécnica de Delft, crea un transistor a partir de un nanotubo de carbono.
1999. James Tour, hoy en la Universidad Rice, y Mark Reed, de la Universidad de Yale, demuestran que las moléculas individuales pueden actuar como conmutadores moleculares.
2000. La administración Clinton anuncia la Iniciativa Nacional de Nanotécnica, que aporta un fuerte impulso económico y da mayor relieve a estas actividades.
2000. Eigler y otros investigadores idean un espejismo cuántico. La colocación de un átomo magnético en un foco de un anillo elíptico de átomos crea un espejismo del mismo átomo en el otro foco, lo que posibilita, quizá, transmitir información sin utilizar hilos.

pero evidentemente más reales. No hay duda de que la etiqueta de “nanotécnica” colocada sobre una propuesta de investigación le da una aureola más atractiva que si se denominara “ciencia aplicada de materiales a mesoescala.”

Lo peligroso es que haya personas inteligentes que tomen al pie de la letra las predicciones de Drexler. La nanotécnica propugnada por este autor obtuvo renovada publicidad el año pasado cuando Bill Joy, director científico de Sun Microsystems, se inquietaba en las páginas de la revista *Wired* por las consecuencias de una multiplicación incontrolable de nanorrobots. Una masa invasora de robots autorreplicantes —lo que él llamó “plaga gris”— podría plantear una amenaza a la sociedad que hiciera pensar en detener el desarrollo de la nanotécnica. Pero esta sugerencia desvía la atención de la verdadera plaga a temer: las armas químicas y biológicas.

Entre los químicos y físicos de materiales dedicados a la aplicación nanotécnica, las predicciones de Drexler se consideran un tanto extravagantes; la ciencia ni por asomo es capaz de construir máquinas nanoscópicas capaces de hacer revivir cerebros congelados una vez suspendida su animación. (En este número aparecen ensayos de Drexler y sus críticos, incluido el premio Nobel Richard E. Smalley.) La compañía Zyvex ha reconocido la dificultad de crear robots a escala nanométrica y está trasteando con elementos micromecánicos mucho mayores, desdeñados en las obras de Drexler.

Dejando aparte la plaga gris, el campo nanotécnico lucha por alcanzar la cohesión. Parte de la investigación habría progresado sin cuidarse de su denominación. La fusión de los términos “nano” y “técnica” fue una designación posterior: IBM habría seguido adelante con las cabezas gigantes magnetorresistivas, se llamase o no nanotécnica su labor investigadora.

Para consolidar una sólida unificación de las ciencias aplicadas en este terreno, hay que demostrar la

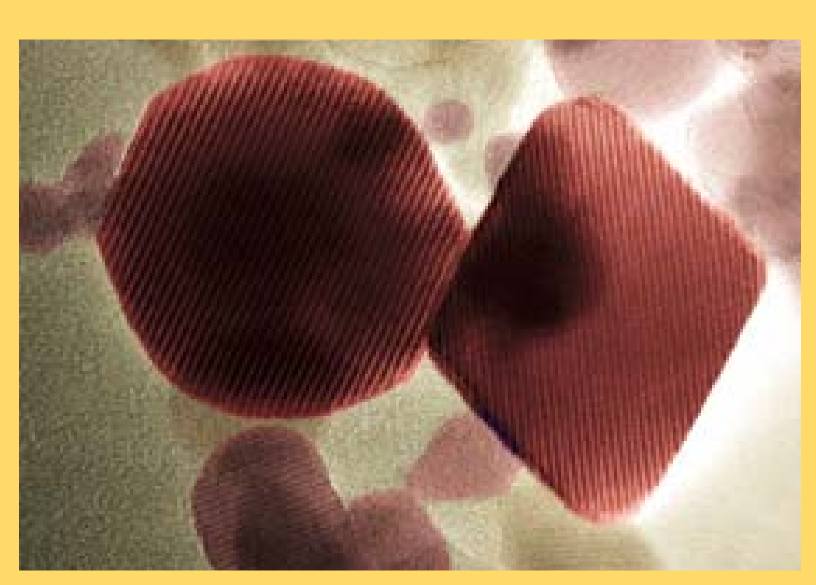
Nanotécnica a la venta

APLICACION: CATALIZADORES
COMPAÑIA: EXXONMOBIL
DESCRIPCION: Zeolitas, minerales con poros de tamaño inferior a un nanómetro, que sirven de catalizadores de suma eficacia para disgregar o partir las grandes moléculas de hidrocarburos y formar gasolina.

APLICACION: ALMACENAMIENTO DE DATOS
COMPAÑIA: IBM
DESCRIPCION: En los años más recientes, los controladores de discos han incorporado capas nanométricas —que explotan el efecto de magnetorresistencia gigante— para lograr una elevada densidad de almacenamiento de datos.

APLICACION: ENCAPSULADO DE FARMACOS
COMPAÑIA: GILEAD SCIENCES
DESCRIPCION: Esferitas de lípidos, llamadas liposomas, de unos 100 nanómetros de diámetro, que encapsulan un fármaco anticáncer para el tratamiento del sarcoma de Kaposi asociado al sida.

APLICACION: FABRICACION CON MATERIAS PRIMAS
COMPAÑIA: CARBON NANOTECHNOLOGIES
DESCRIPCION: Fundada entre otros por Richard Smalley, descubridor de las buckybolas, la empresa utiliza un proceso de fabricación nuevo para abaratar los nanotubos de carbono.



NANOPARTICULAS producidas por Nanophase Technologies.

APLICACION: MEJORA DE MATERIALES
COMPAÑIA: NANOPHASE TECHNOLOGIES
DESCRIPCION: Se incorporan partículas nanocristalinas a otros materiales para producir cerámicas más duras, filtros solares transparentes que detengan la radiación infrarroja y ultravioleta, y catalizadores para aplicaciones ambientales o de otro tipo.

utilidad de agrupar esfuerzos en áreas muy diversas. ¿Pueden tener intereses comunes los investigadores sobre polvos nanométricos para cremas protectoras y los que trabajan en la informatización del ADN? En algunos casos estos sueños de interdependencia son verosímiles. Un punto cuántico semiconductor originalmente concebido para electrónica y que ahora se utiliza para detectar actividad biológica en las células evidencia la posibilidad de desarrollar trabajos interdisciplinares.

Si la concepción nano mantiene su unidad, podría sentar las bases de una nueva revolución industrial. Pero su éxito depende de saber desechar no sólo las fantasías sobre nanorrobots, sino también la excesiva retórica capaz de hacer descarrilar cualquier gran proyecto de financiación en el futuro. Y lo más importante es contar con los principios científicos básicos para identificar cuáles son las nanotécnicas que vale la pena desarrollar. No es ningún grano de anís distinguir entre lo real y lo irreal en ese mundo.



Nanotécnica y sus procesos de fabricación

Los investigadores descubren procesos económicos y eficaces para construir estructuras de pocos nanómetros de anchura

George M. Whitesides y J. Cristopher Love

La búsqueda de una creciente miniaturización ha transformado el mundo. El desarrollo de la microelectrónica —primero el transistor y después la agrupación de transistores para crear microprocesadores, chips de memoria y controladores— ha hecho aparecer una amplia variedad de máquinas que manipulan información dirigiendo corrientes de electrones a través de silicio. La microelectrónica se basa en técnicas rutinarias que fabrican estructuras de muy poco más de 100 nanómetros de ancho (un nanómetro es 10^{-9} metros). Esta dimensión —alrededor de la milésima parte del grosor de un cabello humano— es insignificante para nuestra vida cotidiana, pero grande en la esfera de los átomos y las moléculas. El diámetro de un hilo de 100 nanómetros cubriría cerca de 500 átomos de silicio.

La idea de construir "nanoestructuras" que comprendan sólo uno o algunos átomos es muy atractiva, como reto científico a la vez que como solución práctica. Una estructura del tamaño de un átomo constituye un límite fundamental: para hacer algo más pequeño habría que manipular los núcleos atómicos; en esencia, transmutar un elemento químico en otro. En los últimos años, se han aprendido diversas técnicas para la construcción de nanoestructuras, pero apenas se han comenzado a investigar sus propiedades y posibles aplicaciones.

LOS PATRONES DE DIFRACCION COMPLEJOS están creados por anillos de anchura nanométrica (invisibles debido a su pequeñez) en la superficie de hemisferios de un polímero claro, de un centímetro de diámetro. Kateri E. Paul, doctorando del grupo de Whitesides en Harvard, formó los anillos en una fina capa de oro sobre los hemisferios, utilizando por técnica de nanofabricación la litografía blanda.

El enfoque tradicional

Es perfectamente posible desarrollar nanoestructuras que actúen como componentes electrónicos, pero las aplicaciones principales tal vez difieran bastante: por ejemplo, el uso de partículas nanométricas como minúsculos sensores para investigar células en biología. Pero como los científicos no saben los tipos de nanoestructuras que finalmente desean construir, aún no han determinado los mejores procedimientos para elaborarlas. La fotolitografía, técnica utilizada para fabricar chips de ordenadores y los demás sistemas microelectrónicos, puede perfeccionarse para construir estructuras por debajo de 100 nanómetros; conseguirlo resulta, sin embargo, difícil, caro y correoso.

Consideremos primero las ventajas y desventajas de la fotolitografía. Mediante esta técnica tan productiva salen de fábrica tres mil millones de transistores por segundo, sólo en los EE.UU. En esencia, no es sino una extensión de

la fotografía. Primero se obtiene lo equivalente a un negativo fotográfico que contiene el esquema requerido para una parte de los circuitos del microchip. Este negativo, llamado máscara o patrón, se utiliza después para copiar el esquema en los metales y semiconductores de un microchip. Como sucede con la fotografía, el negativo tal vez sea difícil de obtener, pero es fácil multiplicar las copias porque la máscara puede utilizarse muchas veces. El proceso, pues, se divide en dos etapas: la preparación de la máscara (un solo evento, quizá lento y costoso) y el uso de la máscara para fabricar réplicas (rápido y económico).

Para elaborar la máscara de parte de un chip, el fabricante diseña primero el esquema de los circuitos a una escala suficientemente grande, que luego convierte a un esquema en película metálica opaca (cromo), aplicado sobre una placa transparente (vidrio o sílice). A continuación, la fotolitografía reduce el tamaño del esquema siguiendo un proceso análogo al de los laboratorios fotográficos. Se hace pasar por la máscara de cromo un haz luminoso (luz ultravioleta de una lámpara de arco de mercurio), que atraviesa después una lente para formar una imagen sobre un revestimiento fotosensible de polímero orgánico (llamado fotorresistor) en la superficie de una oblea de silicio. Las zonas del fotorresistor donde incide la luz pueden eliminarse selectivamente, con lo cual se exponen partes de la oblea de silicio de tal manera que se reproduce el esquema original.

¿Por qué no emplear la fotolitografía para fabricar nanoestructuras? La técnica tropieza aquí con dos limitaciones. La primera es que la mínima longitud de onda de luz ultravioleta que se emplea en los procesos de producción ronda los 250 nanómetros. Intentar construir estructuras mucho menores que la mitad de esa distancia viene a ser como pretender leer un texto de letra demasiado menuda; los trazos se desdibujan y confunden a causa de la difracción. Algunas mejoras de la técnica podrían ensanchar los límites de la fotolitografía. Las menores estructuras obtenidas en la producción industrial son algo mayores que 100 nanómetros, y se han conseguido estructuras microelectrónicas complejas de sólo 70 nanómetros. Pero tales estructuras no son lo suficientemente diminutas como para explorar algunos de los más interesantes aspectos de la disciplina.

La segunda limitación es consecuencia de la primera: la dificultad técnica de fabricar estructuras tan pequeñas por medio de la luz determina también su enorme coste. Los instrumentos fotolitográficos necesarios para fabricar chips con dimensiones inferiores a 100 nanómetros costarán miles de millones de pesetas por unidad. Los fabricantes podrán aceptar o no este gasto, que resultará, en todo caso, prohibitivo para los biólogos, químicos, físicos de materiales y otros que deseen explorar la nanotécnica con estructuras de su propio diseño.

Los nanochips del futuro

La industria electrónica ha mostrado su interés por desarrollar nuevos métodos para la nanofabricación con el fin de continuar su tendencia a producir dispositivos cada vez menores, más rápidos y menos costosos. La nanoelectrónica vendría, pues, a ser una evolución natural de la microelectrónica. Pero la fotolitografía tradicional es tanto más difícil cuanto más se achican las dimensiones de las estructuras. Por ese motivo se están explorando otras técnicas para la fabricación futura de nanochips.

La litografía por haz electrónico es una opción competitiva. Consiste en grabar el esquema del circuito sobre una capa delgada de polímero por medio de un haz de electrones. Estos haces no se difractan a escala atómica, y por tanto no difuminan los bordes de las líneas trazadas. Se ha recurrido a esta técnica para grabar líneas de sólo unos nanómetros de anchura en una capa fotosensible (fotorresina) extendida sobre un sustrato de silicio. Los instrumentos de haz electrónico hoy disponibles son, sin embargo, muy caros e inviables para la fabricación en gran escala. Puesto que se necesita el haz de electrones cada vez que se fabrica una estructura, el proceso se asemeja a la copia manual de un manuscrito, línea a línea.

Si la respuesta no se halla en los electrones, ¿dónde se esconde? Otra posible solución es la litografía por rayos X, con longitudes de onda entre 0,1 y 10 nanómetros, o por luz en el ultravioleta extremo, con longitudes de onda de 10 a 70 nanómetros. Dado que estas radiaciones son de longitud de onda muy inferior a la de la luz ultravioleta utilizada hoy en fotolitografía, la borrosidad producida por difracción será mínima. Estas técnicas se enfrentan, sin embargo, a una serie de problemas propios: las lentes habituales no son transparentes a la luz ultravioleta extrema, y no enfocan los rayos X. Por si fuera poco, la radiación energética deteriora rápi-

Resumen/Nanofabricación

- El desarrollo de la nanotécnica dependerá de la capacidad de fabricar eficazmente estructuras menores de 100 nanómetros de ancho.
- La fotolitografía, hoy utilizada para realizar circuitos en microchips, puede adaptarse para la creación de estructuras nanométricas, aunque con dificultades técnicas y a costes desmesurados.
- Los métodos de nanofabricación pueden dividirse en dos categorías: descendentes, que separan o agregan moléculas a una superficie, y ascendentes, que ensamblan átomos o moléculas para formar nanoestructuras.
- Dos ejemplos de métodos descendentes prometedores son la litografía blanda y la litografía de pluma bañada. Se utilizan métodos ascendentes para producir puntos cuánticos, capaces de servir de colorantes biológicos.

damente muchos de los materiales empleados en máscaras y lentes. Pero es obvio que la industria microelectrónica preferiría fabricar los nuevos chips siguiendo técnicas familiares perfeccionadas, y en esa dirección se trabaja con afán. Algunas de las técnicas investigadas (la litografía ultravioleta avanzada, por ejemplo) terminarán por llegar al mercado. Sin embargo, no conseguirán abaratar las nanoestructuras, ni servirán, en consecuencia, para ensanchar el acceso a la nanotécnica de ingenieros y científicos.

La necesidad de encontrar métodos más sencillos y económicos para fabricar nanoestructuras ha estimulado la búsqueda de caminos no hollados. Nuestro interés por el tema data de los años noventa, cuando nos dedicábamos a construir estructuras elementales que se requieren en los sistemas microfluídicos, es decir, chips con canales y cámaras capaces de contener líquidos. Tal microlaboratorio ofrece un sinfín de aplicaciones en bioquímica, que van desde el filtrado de fármacos hasta el análisis genético. Los canales en este tipo de chips son enormes en términos de microelectrónica: 50 micrometros (50.000 nanómetros), frente a los 100 nanómetros típicos, pero su producción admite técnicas muy versátiles. La fabricación de chips microfluídicos puede ser rápida y económica, pues se emplean polímeros y geles orgánicos, materiales ajenos al mundo de la electrónica. Descubrimos entonces que podíamos aplicar técnicas similares para construir nanoestructuras.

Hasta cierto punto, los métodos ensayados representaban un retroceso en la técnica. En vez de servirnos de agentes físicos —luz y electrones— utilizábamos procesos mecánicos corrientes: impresión, estampado, moldeado y grabado en relieve. Estas técnicas se denominan “litografía blanda” por manejar como herramienta común un bloque de polidimetilsiloxano (PDMS), el polímero gomoso que sirve para tapar grietas en las bañeras. (Los físicos suelen llamar “materias blandas” a estos compuestos orgánicos.)

Para realizar una reproducción mediante litografía blanda, se empieza construyendo un molde o matriz. Se recurre a la fotolitografía o litografía de haz electrónico para crear un esquema en la capa de polímero fotorresistor depositada en la superficie de una oblea de silicio. Se genera así un patrón en bajorrelieve en el que emergen del silicio islas de esa fotorresina. Seguidamente se vierte sobre el patrón un precursor químico del PMDS —un líquido de plena fluidez—, que se endurece para formar el sólido gomoso. Lo que se obtiene es una matriz en PDMS, que copia con asombrosa fidelidad el esquema original, llegando a reproducir detalles de unos pocos nanómetros. Aunque sea caro crear un patrón en bajorrelieve de fina resolución por exigir litografía de haz electrónico u otras técnicas avanzadas, su copia en matrices PDMS resulta fácil y económica. Y una vez obtenida la matriz, es posible utilizarla para construir nanoestructuras por diversos procedimientos poco costosos.

El primer método —ideado por Amit Kumar, alumno nuestro de posdoctorado en Harvard— se denomina impresión por microcontacto. La matriz PDMS se “entinta” con una solución reactiva compuesta de tioles, moléculas orgánicas. Después, se pone la matriz en contacto con una lámina adecuada de “papel”, esto es, una fina película de oro depositada sobre una placa de vidrio, silicio o polímero. Los tioles reaccionan con la capa de oro y forman una película sumamente estructurada, la monocapa autoensamblada, o SAM, donde se reproduce el esquema de la matriz. Dado que la tintura de tiol se extiende un poco al tocar la superficie, la monocapa no alcanza la re-

FOTOLITOGRAFIA TRADICIONAL



1 Un haz láser graba el esquema del microcircuito en una película de polímero fotosensible depositada sobre una capa de cromo y un sustrato de vidrio. Las zonas del polímero expuestas al haz pueden eliminarse selectivamente.

2 Las partes expuestas del cromo se eliminan también, y el resto del polímero se disuelve. Se obtiene así una máscara, equivalente a un negativo fotográfico.

3 Cuando se dirige a la máscara un haz de luz ultravioleta, la luz atraviesa los huecos dejados en el cromo. El esquema se achica por medio de una lente, que enfoca la luz sobre la capa de fotorresina que recubre una oblea de silicio.

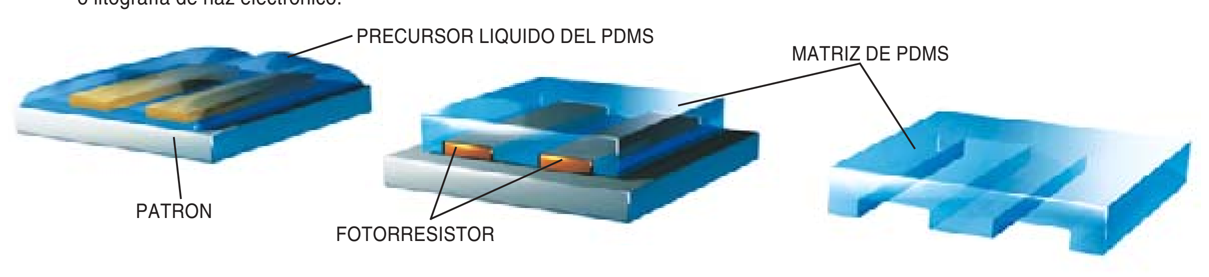
4 Las partes expuestas de la fotorresina se eliminan, lo que permite la reproducción del esquema en miniatura sobre los chips de silicio.

LITOGRAFIA BLANDA

La impresión, el moldeo y otros procesos mecánicos realizados mediante una matriz elástica pueden conseguir esquemas de características nanométricas.
Las técnicas permiten fabricar dispositivos para comunicaciones ópticas o investigación bioquímica.

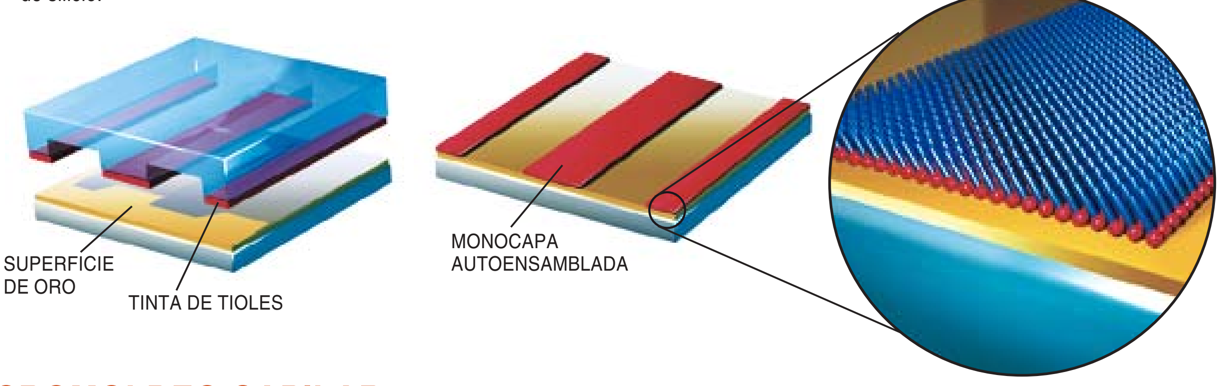
PRODUCCION DE LA MATRIZ ELASTICA

1. Se vierte un precursor líquido del polidimetilsiloxano (PDMS) sobre un patrón en bajorrelieve producido por fotolitografía o litografía de haz electrónico.
2. El líquido se endurece y forma un sólido gomoso que se ajusta al esquema original.
3. La matriz PDMS se desprende del patrón.

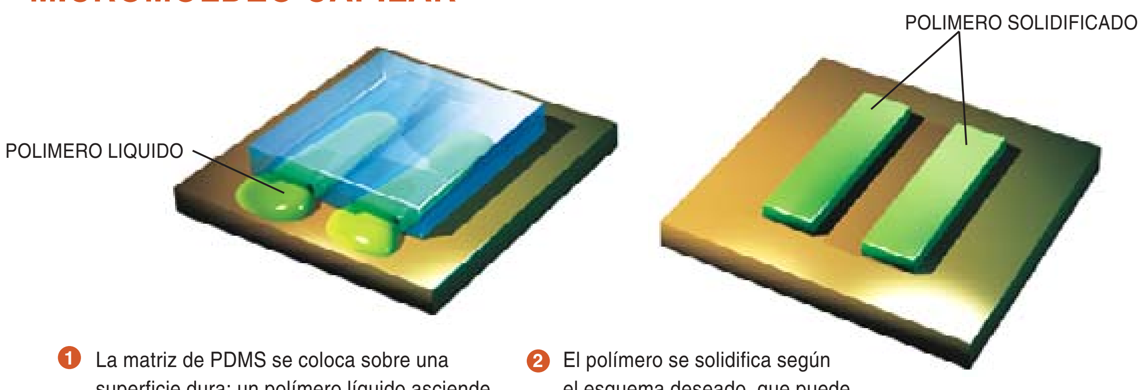


IMPRESION POR MICROCONTACTO

1. La matriz PDMS se entinta con una solución compuesta de tioles, moléculas orgánicas; después se comprime contra una fina capa de oro depositada sobre una placa de silicio.
2. Los tioles forman una monocapa autoensamblada sobre la superficie de oro en la que se reproduce el esquema de la matriz, con dimensiones de 50 nanómetros.



MICROMOLDEO CAPILAR



1. La matriz de PDMS se coloca sobre una superficie dura; un polímero líquido asciende hacia las cavidades existentes entre la superficie y la matriz.
2. El polímero se solidifica según el esquema deseado, que puede contener dimensiones menores de 10 nanómetros.

Los autores

GEORGE M. WHITESIDES y J. CHRISTOPHER LOVE investigan conjuntamente métodos de nanofabricación novedosos en la Universidad de Harvard. Whitesides, profesor de química, se doctoró por el Instituto de Tecnología de California en 1964 y se incorporó a Harvard en 1982. Love inició su formación química en la Universidad de Virginia, que completó en la de Harvard.

solución de la matriz PDMS. Pero, aplicada correctamente, la impresión por microcontacto puede producir patrones con dimensiones de tan sólo 50 nanómetros.

Otro método de litografía blanda, llamado micromoldeo capilar, requiere utilizar la matriz PDMS para moldear los esquemas. Al colocar la matriz sobre una superficie dura, asciende por capilaridad un polímero líquido hacia las cavidades situadas entre la matriz y la superficie. El polímero se solidifica luego según el esquema deseado. Con esta técnica pueden replicarse estructuras menores de 10 nanómetros. Resulta idónea para producir dispositivos ópticos en sublongitudes de onda, guiaondas y polarizadores ópticos, todos ellos susceptibles de aplicación en redes de fibra óptica y quizás en computadores ópticos. También pueden hallar sitio en el campo de la nanofluídica, ampliación de la microfluídica en la que se producirían chips para investigaciones bioquímicas con canales de sólo algunos nanómetros de anchura. A esa escala, la dinámica de fluidos podría descubrir nuevos procedimientos para separar fragmentos de ADN, entre otros materiales.

Estos métodos no requieren equipos especializados. De hecho pueden desarrollarse de modo manual en un laboratorio ordinario. La fotolitografía tradicional exige una instalación en sala blanca, exenta de polvo y suciedad; una partícula de polvo posada sobre la máscara producirá una mancha intolerable en el esquema y podrá originar el fallo del dispositivo fabricado (y a veces de los que le rodean). La litografía blanda suele ser más tolerante por la elasticidad de la matriz PDMS. Si queda atrapada una mota de polvo entre la matriz y la superficie, la matriz presionará sobre la parte superior de la partícula, pero mantendrá contacto con el resto de la superficie. Entonces se reproducirá correctamente el patrón excepto en el lugar donde quedó atrapado el contaminante.

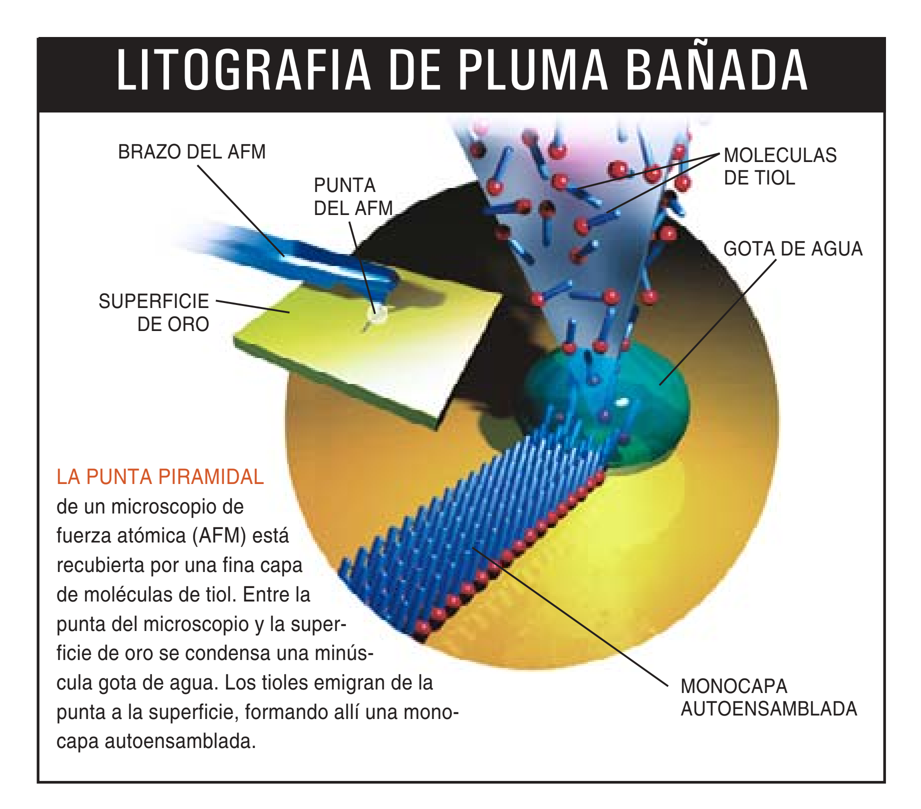
Además, la litografía blanda permite obtener nanoestructuras en una extensa gama de materiales, incluidas las complejas moléculas orgánicas necesarias para estudios biológicos. Es posible imprimir o moldear esquemas lo mismo sobre superficies curvas que sobre superficies planas. Pero la técnica no es la más indicada para realizar las estructuras que requiere la nanoelectrónica compleja. Actualmente todos los circuitos integrados se componen de capas apiladas de diferentes materiales. Las deformaciones y distorsiones de la matriz blanda PDMS generan pequeños errores en el esquema replicado y un desajuste entre ese esquema y cualesquiera esquemas subyacentes fabricados previamente. Por pequeñas que sean las distorsiones o desajustes, se bastan para estropear un dispositivo multicapa nanoelectrónico. De ahí que la litografía blanda no sea muy adecuada para la fabricación de estructuras con múltiples capas que han de apilarse unas sobre otras con precisión absoluta.

Se han encontrado, sin embargo, maneras de corregir —al menos en parte— este inconveniente, utilizando una matriz rígida en lugar de una elástica. En cierta técnica litográfica de fotoimpresión automática por iluminación ultravioleta, desarrollada por Grant Willson, de la Universidad de Texas, se recurre a la fotolitografía para grabar un esquema en una placa de cuarzo, obteniendo así un patrón rígido en bajorrelieve. Willson suprimió la etapa de construir una matriz PDMS a partir del patrón; en su caso es el propio patrón el que se comprime contra una fina película de polímero líquido, que rellena las cavidades del patrón. A continuación, se expone el patrón a la luz ultravioleta; ésta solidifica el polímero para crear la réplica deseada. Debemos a Stephen Chou, de la Universidad de Princeton, una técnica afín, llamada litografía por nanoimpresión, en la que también se emplea un patrón rígido, pero la película de polímero utilizada se calienta a una temperatura cercana al punto de fusión para facilitar el proceso de grabado en relieve. Por ambos métodos pueden obtenerse estructuras bidimensionales con fidelidad satisfactoria; falta ver si las técnicas resultan adecuadas para la fabricación de dispositivos electrónicos.

Trasladar los átomos

La revolución actual en el dominio nanométrico se inició en 1981, con la invención del microscopio de barrido por efecto túnel (STM), por el que ganaron el premio Nobel de física en 1986 Heinrich Rohrer y Gerd Binnig, del Laboratorio IBM en Zurich. Con tan sutil ingenio se detectan las minúsculas corrientes que se establecen entre la punta del microscopio y la muestra observada, permitiendo "ver" substancias a escala de átomos individuales. El éxito del STM condujo a desarrollar otras sondas de exploración, entre ellas el microscopio de fuerza atómica (AFM). El principio de funcionamiento del AFM es similar al de un viejo fonógrafo. Una diminuta sonda —una fibra o una punta en forma de pirámide de dos a 30 nanómetros de anchura— se pone en contacto directo con la muestra. La sonda está fijada al extremo de un brazo, que flexiona al desplazarse la punta por la superficie de la muestra. Para medir la deflexión, se refleja un haz de luz láser en la cara superior del brazo. El AFM es capaz de detectar variaciones menores que las dimensiones de la sonda en la topografía vertical de una superficie.

Pero las sondas de barrido sirven para mucho más que para la simple observación del mundo atómico: también valen para crear nanoestructuras. La punta del AFM mueve nanopartículas a través de superficies y las ordena según esquemas. También puede utilizarse para hacer incisiones en una superficie (o más corrientemente en las películas monocapa de átomos



LA PUNTA PIRAMIDAL de un microscopio de fuerza atómica (AFM) está recubierta por una fina capa de moléculas de tiol. Entre la punta del microscopio y la superficie de oro se condensa una minúscula gota de agua. Los tioles emigran de la punta a la superficie, formando allí una monocapa autoensamblada.

o moléculas que recubren esa superficie). De modo similar, si se aumentan las corrientes que salen de la punta AFM, el microscopio se convierte en un minúsculo generador de haz electrónico, apto para grabar esquemas a escala nanométrica. Además, esa punta puede desplazar los átomos uno a uno sobre una superficie de suerte que formen anillos e hilos de un solo átomo de anchura.

Un curioso método nuevo de fabricación por sonda de barrido es la litografía de pluma bañada, desarrollada por Chad Mirkin, de la Universidad del Noroeste. Esta técnica recuerda la escritura con pluma de ganso: la punta del AFM se recubre con una delgada película de moléculas de tiol, que, aunque insolubles en agua, reaccionan con una superficie de oro (el mismo proceso químico de la impresión por microcontacto). Cuando el instrumento se coloca en una atmósfera donde existe una elevada concentración de vapor de agua, se condensa una diminuta gota de agua entre la superficie de oro y la punta del microscopio. La tensión superficial mantiene la punta a una distancia fija del oro, distancia que no varía al moverse la punta a través de la superficie. La gota de agua actúa a manera de puente por donde las moléculas de tiol emigran de la punta a la superficie del oro y se quedan allí fijas. Se ha aplicado este procedimiento para grabar líneas de muy pocos nanómetros.

Aunque la litografía de pluma bañada sea un tanto lenta, puede utilizar como "tinta" muchos tipos diferentes de moléculas. Aporta así una gran flexibilidad química a la grabación en escala nanométrica. Todavía no se ha determinado cuáles serían las aplicaciones óptimas de esta técnica, pero una de ellas podría consistir en ejecutar modificaciones precisas de diseños de circuitos. Mirkin acaba de demostrar que esta clase de litografía permite grabar directamente sobre el silicio utilizando una variante de la tinta.

Una técnica interesante, emparentada con las anteriores, se sirve de otro tipo de nanoestructura, denominado unión de ruptura. Si de un fuerte tirón se parte en dos trozos un hilo metálico fino y dúctil, el proceso parece brusco a los ojos humanos, pero en realidad recorre una secuencia compleja. Al aplicar la fuerza disyuntora, el metal empieza a ceder y estirarse, disminuyendo el diámetro del hilo. A medida que se separan los dos extremos, el hilo se adelgaza más y más hasta que, en el preciso instante anterior a la ruptura, hay un solo átomo en el diámetro del punto más estrecho. El proceso de adelgazamiento del hilo hasta la unión de ruptura se detecta midiendo la corriente que pasa por el hilo. Cuando éste es suficientemente delgado, la corriente sólo circula en cantidades discretas (es decir, está cuantificada).

La unión de ruptura es comparable a dos puntas STM enfrentadas. La corriente que por ella circula se rige por reglas físicas similares. Mark Reed, de la Universidad de Yale, ha introducido una aplicación innovadora de la unión de ruptura. Consiste en un dispositivo que permite romper una unión delgada en condiciones controladas y volver a unir después los extremos rotos, o bien mantenerlos a una separación fija constante, con precisión de milésimas de nanómetro. Ajustando la distancia de separación en presencia de la molécula orgánica que unía esas extremidades, Reed pudo medir la corriente que atravesaba el puente orgánico. El experimento significó un paso importante en el desarrollo de técnicas que utilizan moléculas orgánicas aisladas como dispositivos electrónicos (diodos y transistores) [*véase* "Computación molecular" de Mark A. Reed y James M. Tour; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2000].

De arriba abajo y de abajo arriba

Todas las formas de litografía examinadas hasta ahora se consideran métodos descendentes (de arriba abajo), es decir, se empieza por un esquema generado a escala mayor y sus dimensiones laterales se reducen (a menudo por un factor de 10) antes de grabar las nanoestructuras. Es preciso trabajar así para la fabricación de dispositivos electrónicos como los microchips, cuyas funciones dependen más de los esquemas que de las dimensiones. Pero ningún método descendente es la panacea; nin-

guno puede conseguir nanoestructuras de cualquier material con comodidad, rapidez y a bajo coste. Por ello los investigadores se interesan cada vez más por los procesos ascendentes (de abajo arriba), que parten de los átomos o moléculas y llegan a construir nanoestructuras. Estos métodos pueden obtener fácilmente las nanoestructuras más pequeñas —de dimensiones entre 2 y 10 nanómetros— de una manera económica. Pero tales estructuras suelen generarse como partículas simples en suspensión o depositadas en superficies, más que como esquemas de diseño interconectados.

Dos de los principales métodos ascendentes se aplican a la obtención de nanotubos y puntos cuánticos. Los primeros son largos tubos cilíndricos de carbono construidos por un proceso de crecimiento catalítico en el que se vierte, a escala nanométrica, metal fundido (generalmente hierro) como catalizador [*véase* "Introducción de los nanotubos en el dominio de la electrónica", de Philip G. Collins y Phaedon Avourist; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2001]. El área de investigación más activa en puntos cuánticos fue el laboratorio de Louis Brus (por entonces en los laboratorios Bell), continuando su desarrollo A. Paul Alivisatos, de la Universidad de California en Berkeley, y Moungi Bawendi, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, entre otros. Los puntos cuánticos son cristales que contienen unos pocos cientos de átomos nada más. Como los electrones de un punto cuántico están confinados en niveles de energía muy separados, el punto emite sólo una longitud de onda al ser excitado. Esta propiedad da utilidad al punto cuántico como marcador biológico.

Un procedimiento utilizado para obtener puntos cuánticos implica una reacción química entre un ion metálico (cadmio, por ejemplo) y una molécula que sea capaz de donar un ion de selenio. Esta reacción genera cristales de seleniuro de cadmio. El truco consiste en impedir que los cristales se adhieran entre sí a la par que crecen hasta el tamaño deseado. Para aislar unas de otras las partículas en crecimiento, la reacción se realiza en presencia de moléculas orgánicas que actúen como surfactantes, revistiendo la superficie de cada partícula de seleniuro de cadmio a medida que crece. Estas moléculas orgánicas evitan el amontonamiento de los cristales y regulan su velocidad de crecimiento. La geometría de las partículas puede controlarse hasta cierto punto mezclando moléculas orgánicas en diferentes proporciones. La reacción puede generar partículas de formas diversas, como esferas, varillas y tetrápodos (partículas de cuatro brazos).

Importa sintetizar puntos cuánticos de dimensiones y composición uniformes, puesto que el tamaño del punto determina sus propiedades electrónicas, magnéticas y ópticas. Se puede seleccionar el tamaño de las partículas variando el tiempo que dura la reacción. El revestimiento orgánico ayuda también a fijar el tamaño. Cuando la nanopartícula es minúscula (en la

Nanofabricación: comparación de métodos

Hay una serie de métodos en desarrollo para construir estructuras menores de 100 nanómetros. Resumimos aquí las ventajas y desventajas de cuatro de ellos.

Fotolitografía

Ventajas: La industria electrónica está familiarizada con esta técnica, empleada ya en la fabricación de microchips. Es posible modificar la técnica para producir estructuras nanométricas por medio de haces electrónicos, rayos X o luz del ultravioleta extremo.

Desventajas: Las modificaciones necesarias, amén de costosas, resultan muy difíciles desde el punto de vista técnico. Configurar estructuras por haces electrónicas es oneroso y lento. Los rayos X y la luz del ultravioleta extremo pueden dañar al equipo utilizado en el proceso.

Métodos por sonda exploradora

Ventajas: El microscopio de barrido por efecto túnel y el microscopio de fuerza atómica pueden mover nanopartículas una a una y ordenarlas según esquemas. Estos instrumentos permiten construir anillos e hilos de un solo átomo de anchura.

Desventajas: Los métodos son demasiado lentos para la producción industrial. Las aplicaciones de los microscopios probablemente se limitarán a la fabricación de dispositivos especializados.

Litografía blanda

Ventajas: Este método permite reproducir con muy bajo coste esquemas creados por litografía de haz electrónico u otras técnicas afines. La litografía blanda no requiere equipos especiales y puede realizarse manualmente en un laboratorio ordinario.

Desventajas: No es una técnica ideal para fabricar las estructuras multicapa de los dispositivos electrónicos. Los investigadores tratan de superar este inconveniente, pero queda por ver si tendrán éxito en su labor.

Métodos ascendentes

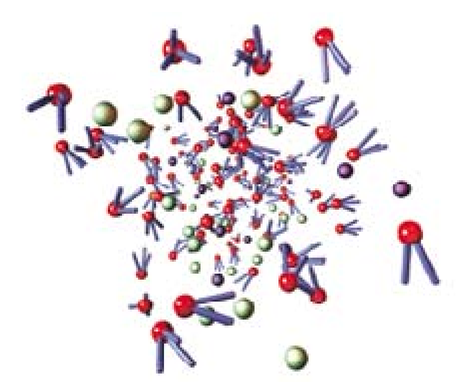
Ventajas: Mediante reacciones químicas cuidadosamente controladas, es posible ensamblar átomos y moléculas de manera fácil y económica para formar estructuras de mínimo tamaño, entre dos y 10 nanómetros.

Desventajas: Estos métodos no permiten producir esquemas de diseño, interconectados, y por tanto no son muy adecuados para construir dispositivos electrónicos como los microchips.

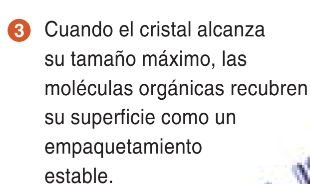
ENSAMBLAJE DEL PUNTO CUANTICO

Los cristales llamados puntos cuánticos solamente contienen unos pocos cientos de átomos y emiten luz en diferentes longitudes de onda, dependiendo de su tamaño. Pueden ser útiles como marcadores biológicos de la actividad celular

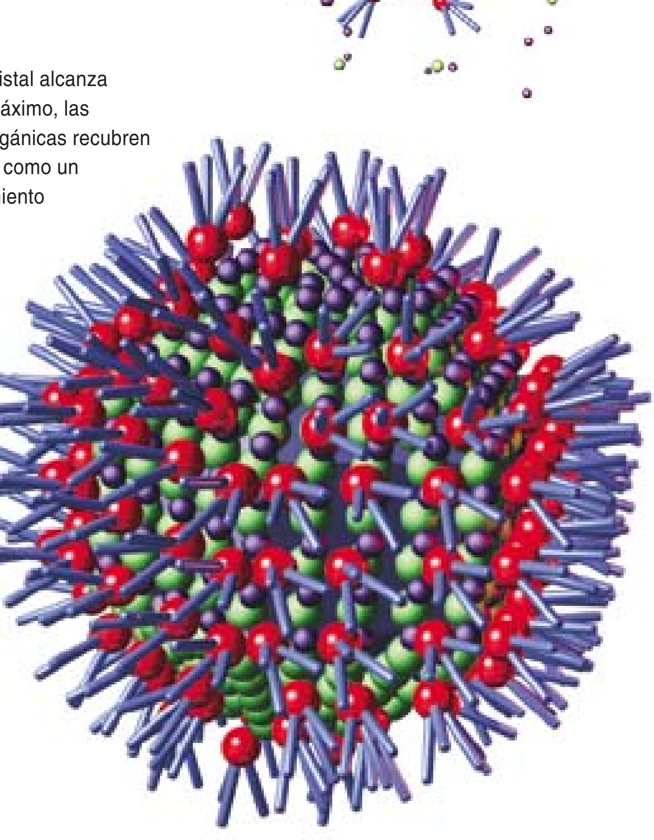
1 Una reacción química agrupa los iones cadmio (*púrpura*), iones de selenio (*verde*) y las moléculas orgánicas (*esferas rojas con cola azul*).



2 Las moléculas orgánicas actúan como surfactantes, adhiriéndose a la superficie del cristal de seleniuro de cadmio a medida que crece éste.



3 Cuando el cristal alcanza su tamaño máximo, las moléculas orgánicas recubren su superficie como un empaquetamiento estable.



escala de las moléculas), el revestimiento orgánico se halla holgado y puede crecer más; al aumentar la partícula, las moléculas orgánicas se aglomeran. Existe un tamaño de partículas óptimo que permite el empaquetado más estable de las moléculas orgánicas y proporciona, por tanto, la máxima estabilización para las superficies de los cristales.

Las nanopartículas de seleniuro de cadmio prometen conseguir algunos de los primeros productos comerciales. Quantum Dot Corporation ha venido desarrollando estos cristales para utilizarlos como etiquetas biológicas. Los investigadores pueden fijar puntos cuánticos para marcar proteínas y ácidos nucleicos; así, al iluminar una muestra con luz ultravioleta, los cristales se tornarán fluorescentes para una determinada longitud de onda y revelarán dónde se ubican las proteínas etiquetadas. Numerosas moléculas orgánicas son también fluorescentes, pero los puntos cuánticos poseen varias ventajas más en ese ámbito. La primera es que el color de la fluorescencia puede ajustarse a voluntad con sólo cambiar el tamaño de la partícula: cuanto mayor sea ésta, más se desplazará hacia el extremo rojo del espectro la luz emitida. La segunda, si todos los puntos son de igual tamaño, presentarán un espectro restringido de fluorescencia: emitirán, pues, un color muy puro. El interés de esta partícula radica en que posibilita el empleo de partículas de diverso tamaño para convertirlas en marcadores distintivos. La tercera, que la fluorescencia de los puntos cuánticos no se desvanece al exponerse a la luz ultravioleta, como sucede con la de las moléculas orgánicas. Los puntos cuánticos utilizados como colorantes en la investigación biológica admiten períodos de observación de la duración que convenga.

Se explora también la posibilidad de construir estructuras a partir de coloides (nanopartículas en suspensión). Christopher Murray y un equipo del Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM estudian la aplicación de coloides para la creación de un medio destinado al almacenamiento de datos

de densidad ultraelevada. Los coloides del equipo IBM contienen nanopartículas magnéticas de tres nanómetros solamente, cada una de ellas compuesta de unos 1000 átomos de hierro y de platino. Cuando se extiende el coloide sobre una superficie y se deja evaporar el disolvente, las nanopartículas cristalizan en redes de dos o tres dimensiones. Los estudios iniciales indican que estas redes tendrían capacidad de almacenar del orden del billón de bits de datos por centímetro cuadrado, o sea, de 10 a 100 veces más que los actuales dispositivos de memoria.

El futuro de la nanofabricación

Las nanoestructuras encierran tal interés, que se están examinando todas las técnicas de fabricación plausibles. Si bien son físicos y químicos los que asumen la mayor parte del trabajo, también los biólogos pueden hacer aportaciones destacadas. El tamaño de una célula (ya sea de mamíferos o de bacterias) es bastante grande en la escala de nanoestructuras: la bacteria típica tiene aproximadamente 1000 nanómetros de largo, y las células de mamíferos son todavía mayores. Pero hay estructuras mucho menores en el interior de las células, de asombrosa complejidad muchas de ellas. Compete al ribosoma, por ejemplo, realizar una de las principales funciones celulares: la síntesis de proteínas a partir de aminoácidos, utilizando como molde el ARN mensajero. La complejidad de este proyecto de construcción molecular sobrepasa ampliamente la de las técnicas creadas por el hombre. Otro ejemplo son los motores rotatorios de los flagelos bacterianos, que propulsan eficazmente los organismos unicelulares.

No está claro si serán útiles las "nanomáquinas" extraídas de las células. Su aplicación a la electrónica será probablemente muy limitada, pero quizá proporcionen instrumentos valiosos para la síntesis química y dispositivos sensores. Los trabajos recientes de Carlo Montemagno, de la Universidad de Cornell, han demostrado que es posible construir una nanomáquina primitiva con un motor biológico. Montemagno extrajo una proteína de motor giratorio de una célula biológica y la conectó a una varilla metálica (un cilindro de 750 nanómetros de largo y 150 de ancho que había sido fabricado por litografía). El motor giratorio, de sólo 11 nanómetros de alto, estaba alimentado por trifosfato de adenosina (ATP), la fuente de energía química de las células, y se demostró capaz de hacer girar la varilla a ocho revoluciones por minuto. Como muy poco, esta investigación estimula los esfuerzos para fabricar nanoestructuras funcionales, demostrando la viabilidad de tales estructuras.

El desarrollo de la nanotécnica dependerá de que haya nanoestructuras disponibles. La invención del STM y el ATM ha aportado nuevos instrumentos para representar, caracterizar y manipular esas estructuras; se trata ahora de saber construirlas bajo pedido y diseñarlas para que realicen funciones nuevas y útiles. La importancia de las aplicaciones electrónicas ha tendido a concentrar la atención en nanodispositivos susceptibles de incorporarse a futuros circuitos integrados. Y por serias razones técnicas, la industria electrónica hace hincapié en métodos que son una ampliación de los actualmente utilizados para fabricar microchips.

Los nuevos modos de enfocar la nanofabricación sólo difieren de los tradicionales en que no son herencia de los desarrollados para dispositivos microelectrónicos. Físicos, químicos y biólogos están aceptando con prontitud estas técnicas como las vías más apropiadas para construir diversos tipos de nanoestructuras destinadas a la investigación. Y los nuevos métodos hasta pueden servir de suplemento a los procesos habituales —fotolitografía, litografía de haz electrónico y técnicas afines—, también para aplicaciones en electrónica. El molde que encerraba la microelectrónica se ha roto. Las ideas y sugerencias para nanofabricación llegan por muchos caminos, en una maravillosa concurrencia de descubrimientos.

Leyes nanoescalares

Hay sitio sobrado para innovaciones prácticas nanoescalares. Pero antes será necesario comprender las leyes físicas que rigen la materia a escala nanométrica

Michael Roukes

En diciembre de 1959, Richard Feynman, futuro premio Nobel, dictó una lección profética, titulada *There's Plenty of Room at the Bottom* ("Queda mucho sitio por debajo"). La ocasión: un congreso de la Sociedad Americana de Física, celebrado en el Instituto de Tecnología de California, a la sazón hogar intelectual de Feynman y que es ahora el mío. Aunque Feynman no tenía tal intención, aquellas 7000 palabras suyas señalaron un hito definitorio en nanotécnica, mucho antes de que el prefijo "nano" asomase por el horizonte.

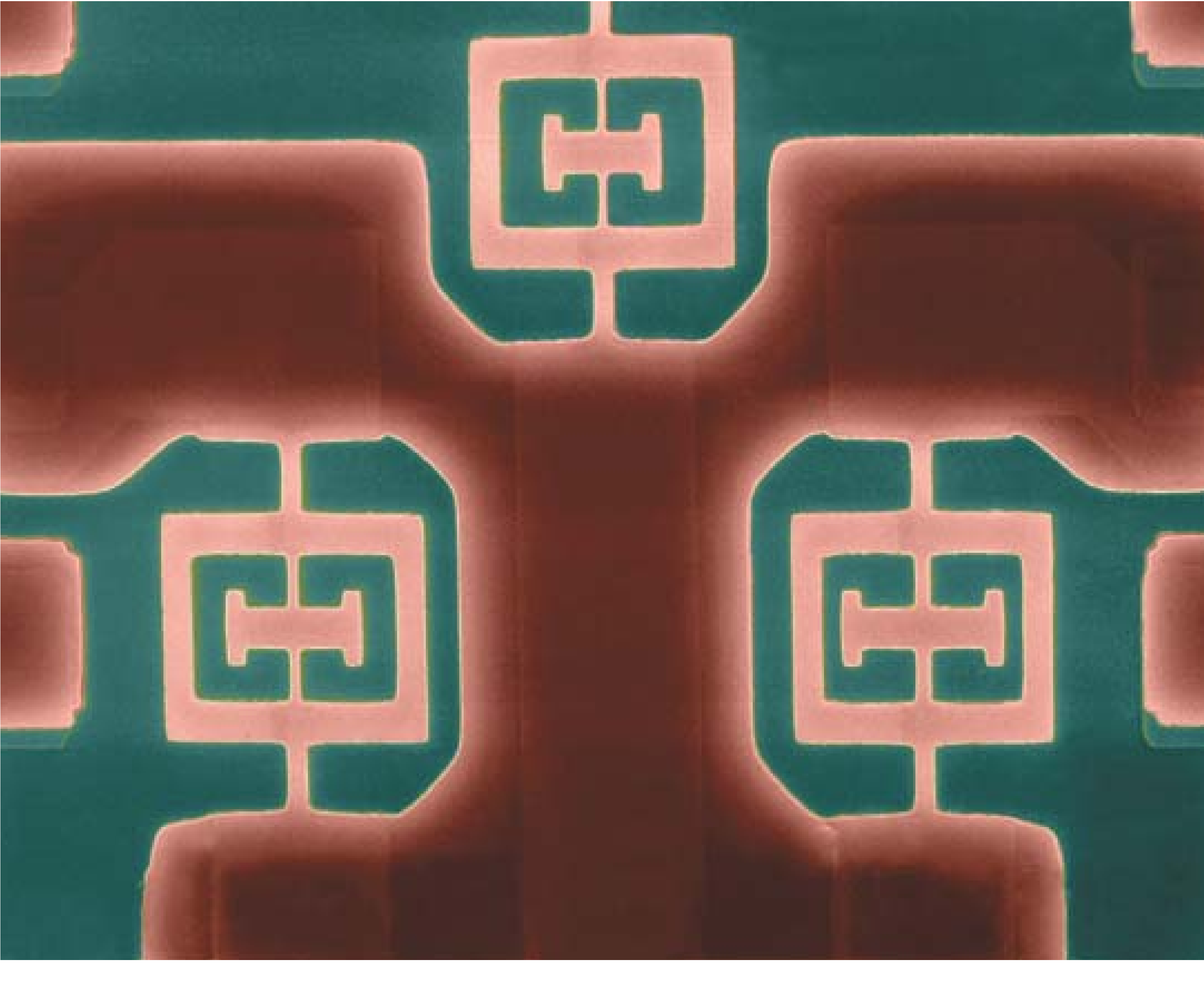
"Quiero referirme", dijo Feynman, *"al problema de la manipulación y control de cosas a pequeña escala... Lo que he demostrado es que hay lugar para ello, que es posible disminuir de forma práctica el tamaño de las cosas. Ahora quiero mostrar que hay* sitio de sobra. *No voy a ocuparme del modo en que vamos a hacerlo, sino sólo de que es, en principio, posible... No lo estamos haciendo, sencillamente, porque todavía no nos hemos puesto a ello."*

En aquella conferencia, pronunciada hace 42 años, anticipaba un espectro de campos científicos o técnicos hoy sólidamente establecidos, entre ellos, la fabricación mediante haces electrónicos o iónicos, la epitaxia por haces moleculares, la litografía por nanoimpresión, la microscopía electrónica de proyección, la manipulación de átomos individuales, la electrónica de efecto cuántico, la electrónica de espín (también llamada espintrónica) y los sistemas microelectromecánicos (SMEM). En la lección sobresalió, junto a tan lúcida profundidad de miras, la "magia" que Feynman aportaba a cuanto aplicaba su intelecto privilegiado.

Asistimos hoy a una especie de "fiebre del oro" nanotécnica. La mayoría de las principales agencias de financiación de ciencia o ingeniería han anunciado su propio envite en este campo. Investigadores e instituciones se han lanzado a la carrera para reclamar una parte del pastel. Pero, seamos honrados, con éxito muy magro.

Hemos empezado apenas a dar los primeros pasos hacia aquella grandiosa visión suya de ensamblar, átomo a átomo, máquinas o circuitos complejos. Lo que hoy por hoy es factible resulta muy rudimentario. No estamos, ni de lejos, en situación de lanzar al comercio nanosistemas producidos en masa, nanodispositivos integrados multicomponentes que ofrezcan la complejidad y el repertorio de funciones que los microcircuitos modernos proporcionan sin dificultad. Se trata también de una cuestión científica fundamental. Hay clara conciencia de que estamos apenas *comenzando* a adquirir el conocimiento detallado que constituirá el alma de la nanotécnica futura. Esta nueva disciplina se ocupa de las propiedades y el comportamiento de agregados de átomos y moléculas, a una escala insuficiente para considerarla macroscópica, pero sí muy distante de lo microscópico. Es el dominio de la *mesoescala*, y hasta que lo comprendamos, difícil va a ser la realización de dispositivos prácticos.

Los ingenieros preparan sin dificultad estructuras a una escala de uno a varios centenares de nanómetros; estructuras pequeñas, en efecto, pero mucho mayores que meras moléculas. La materia, a esta mesoescala, no es sencilla de explorar. Contiene demasiados átomos para que una aplicación di-



1. ESTOS RESONADORES nanoelectromecánicos y otros dispositivos nanotécnicos novedosos están permitiendo descubrir las leyes físicas que rigen las propiedades singulares de la materia en la mesoescala.

recta de la mecánica cuántica permita comprenderla (aunque sus leyes fundamentales sigan vigentes). Por otra parte, tales sistemas no son tan grandes que se encuentren del todo a salvo de efectos cuánticos; no se atienen, pues, sin más, a las leyes clásicas que rigen el macromundo. Es precisamente en este dominio intermedio, el mesomundo, donde surgen propiedades imprevistas de los sistemas colectivos.

Los investigadores están aproximándose a esta frontera transicional por métodos de fabricación complementarios: "de arriba abajo" y "de abajo arriba." Los avances en las técnicas de nanofabricación descendente, como la litografía por haces electrónicos, permiten precisiones a escala cuasiatómica, pero el éxito, por no mencionar la reproductibilidad, al descender al régimen nanométrico monodígito resulta problemático. Se están utilizando también técnicas ascendentes para lograr que los átomos se *ensamblen* por sí mismos.

Ahora bien, el advenimiento del autoensamblaje preprogramado de sistemas arbitrariamente grandes —de complejidad comparable a la que a diario se integra en la microelectrónica, en los SMEM y en la naturaleza— no se observa por ningún punto del horizonte. Da la impresión de que el método descendente seguirá siendo durante bastante tiempo el preferido en la construcción de dispositivos complejos.

Las dificultades para abordar la mesoescala, sea desde arriba o desde abajo, dan fe de un problema físico básico. Ultimamente, la esencia de la lección de Feynman parece estar sirviendo de autorización para el *laissez faire* en nanotécnica. Pero Feynman jamás afirmó que "todo vale" a nanoescala. Ya advirtió, por ejemplo, que el acto mismo de tratar de "*ir colocando los átomos uno a uno, según nos haga falta*" está sujeto a principios fundamentales: "*No es posi-*

El autor

MICHAEL ROUKES, profesor de física en el Instituto de Tecnología de California, dirige un grupo de estudio de sistemas nanoescalares que persigue la mejora, en miles de millones de veces, de la calorimetría. Con ello se abriría la puerta a la observación del intercambio de cuantos caloríficos al enfriarse los nanodispositivos. Su equipo busca, asimismo, aumentar, en un trillón de veces, la sensibilidad de las imágenes obtenidas por resonancia magnética, que permitiría la representación de biomoléculas complejas con resolución atómica tridimensional.

ble colocarlos de modos químicamente inestables, por ejemplo". Y, en efecto, los microscopios de sonda de barrido están capacitados para mover átomos de un lugar a otro sobre una superficie debidamente preparada, pero tal capacidad no confiere la facultad de construir a capricho ensamblajes complejos. Lo conseguido hasta ahora, aunque impresionante, es todavía bastante limitado. Acabaremos desarrollando operatorias que faciliten la formación de enlaces atómicos individuales bajo condiciones más generales. Sin embargo, conforme vayamos tratando de ensamblar redes más complejas de tales enlaces, empezarán a influir unas sobre otras en modos que aún no comprendemos, y que, por ende, se escapan a nuestro control.

Feynman exponía sus profundas lucubraciones con un característico estilo informal y festivo. Para nuestra mala fortuna, la que sería llamada "nanotécnica" era sólo uno de los muchos temas que le intrigaban. De hecho, no perseveró en él, y sólo volvió a tocarlo en 1983, cuando ofreció en el Laboratorio de Propulsión a Chorro una versión resumida de su conferencia.

Vigencia de nuevas leyes

En 1959, y lo mismo en 1983, la imagen física completa de la nanoescala distaba de estar clara. Sigue sin estarlo. Es mucho y exótico el territorio pendiente de exploración. A medida que nos adentremos en él, iremos descubriendo numerosos fenómenos que será necesario comprender antes de que la nanotécnica coseche su primer fruto. Los dos últimos decenios han sido testigos de la elucidación de principios físicos fundamentales y enteramente nuevos que gobiernan el comportamiento en la mesoescala. Veamos tres ejemplos importantes.

En otoño de 1987, Bart J. van Wees, doctorando de la Universidad Politécnica de Delft, y Henk van Houten, de los Laboratorios de Investigación de Philips, hallábanse estudiando el flujo de una corriente eléctrica por "contactos punto-cuánticos". Consisten éstos en estrechas pistas conductoras inscritas en un material semiconductor por donde se ven obligados a fluir los electrones. Ya tarde, una noche, Leo Kouwenhoen, uno de los alumnos que ayudaban a van Wees, estaba midiendo la conductancia en la zona de estricción, cuya anchura hacía variar sistemáticamente. El grupo esperaba hallar sólo sutiles efectos de conductancia superpuestos a una respuesta basal suave, sin grandes variaciones. En lugar de eso apareció una pauta muy pronunciada, en escalones, hoy característica. Esa misma noche, análisis ulteriores revelaron que los peldaños se presentaban a intervalos precisos y regulares.

David Wharam y Michael Pepper, de la Universidad de Cambridge, observaron resultados parecidos. Estos dos descubrimientos constituyeron las primeras demostraciones sólidas de la *cuantización de la conductancia eléctrica*. Se trata de una propiedad básica de los conductores pequeños, que se produce cuando las propiedades ondulomorfas de los electrones se mantienen coherentemente desde la "fuente" al "drenador" —desde el punto de ingreso al de egreso— de un dispositivo nanoelectrónico.

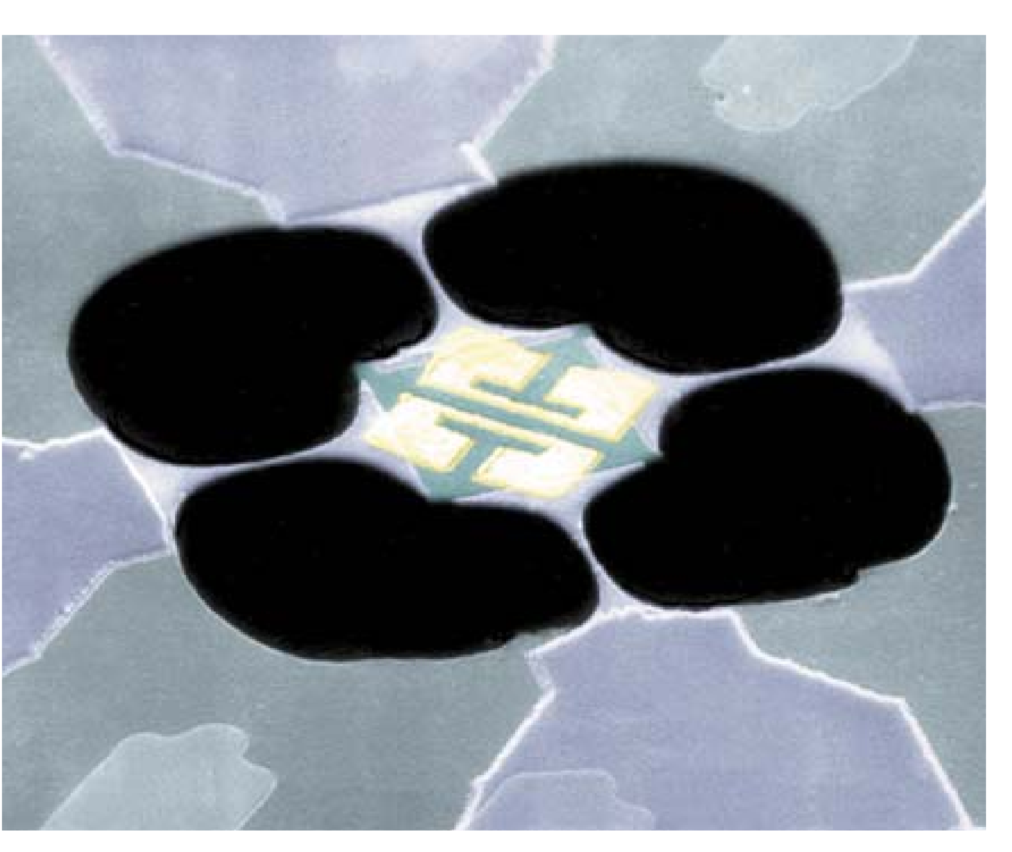
Feynman ya pronosticó, en parte, tan peculiar comportamiento: *"He reflexionado acerca de algunos de los problemas de la construcción de circuitos eléctricos a escala pequeña, y el problema de la resistencia es serio..."*. Pero los descubrimientos experimentales hacían notar algo verdaderamente nuevo y fundamental, a saber, que la mecánica cuántica puede gobernar el comportamiento de los dispositivos eléctricos pequeños.

En 1957 las manifestaciones directas de la mecánica cuántica en tales dispositivos fueron previstas ya en IBM por Rolf Landauer, precursor de muchas ideas sobre electrónica nanoescalar y sobre física de la computación. Pero hasta mediados de los años ochenta el control sobre los materiales y la nanofabricación no empezaron a permitir en el laboratorio el acceso a este régimen. Los descubrimientos de 1987 fueron heraldos del apogeo de la "mesoscopía."

Un segundo e importante ejemplo de ley de mesoescala, descubierto no ha mucho, y que ha conducido a una nanotécnica incipiente, fue postulado en 1985 por Konstantin Likharev, de la Universidad estatal de Moscú, que trabajaba con un posdoctorado, Ale-

Resumen/Nanofísica

- Los dispositivos nanofísicos, mucho menores que los objetos macroscópicos, pero mayores que las moléculas, existen en un dominio peculiar —la mesoescala—, donde las propiedades de la materia están regidas por una combinación compleja y rica de física clásica y de mecánica cuántica.
- No será posible construir nanodispositivos fiables u óptimos mientras no acaben de entenderse los fenómenos físicos prevalecientes a mesoescala.
- La investigación científica está descubriendo las leyes de la mesoescala construyendo sistemas atómicos complejos y poco habituales, y midiendo en ellos su intrigante comportamiento.
- Cuando se descubran y comprendan las leyes científicas subyacentes a la nanotécnica, podrá llevarse a la práctica la visión anticipadora de Richard Feynman: que la naturaleza ha dejado en el nanomundo sitio sobrado para crear dispositivos prácticos.



2. ESTE PUENTE NANOESCALAR permitió a físicos del Caltech observar la cuantización de la conductancia térmica, un límite fundamental del flujo calorífico en objetos diminutos. Cuatro huecos (*en negro*) excavados en una membrana de nitruro de silicio definían un depósito térmico aislado (*cuadrado central verde*), sostenido por cuatro puentes muy estrechos. Un transductor de oro (*amarillo*) calentaba eléctricamente este depósito; el otro medía su temperatura. Unas delgadas películas superconductoras (*azul*), tendidas sobre los puentes, que no transmitían el calor, conectaban los transductores a instrumentación externa. El depósito sólo se podía enfriar a través de los puentes de nitruro de silicio, que eran tan estrechos que sólo dejaban pasar las ondas caloríficas de mínima energía.

xander Zorin, y un estudiante, Dmitri Averin. Estos investigadores previeron la posibilidad de controlar el movimiento de electrones individuales que ingresaran o egresaran de un "islote de Coulomb" (en sustancia, un conductor débilmente acoplado al resto de un nanocircuito). Tal fenómeno podría servir de base para un dispositivo inédito, el transistor monoelectrónico. Los efectos físicos que aparecen al situar un electrón solitario en un islote culombiano se tornan cada vez más robustos conforme se va reduciendo el tamaño del islote. En dispositivos muy pequeños, estos efectos de transferencia monoelectrónica de carga podrían dominar el flujo de corriente.

Tales consideraciones están adquiriendo cada vez mayor importancia técnica. Los pronósticos de Guía Internacional sobre Técnica de Semiconductores, preparados por equipos de previsión a largo plazo en la industria, indican que, hacia 2014, el tamaño del rasgo más pequeño de los transistores integrados en los microcircuitos informáticos se reducirá a unos 20 nanómetros. En esta dimensión, en cada operación de conmutación intervendrá sólo una carga equivalente a unos ocho electrones. Resultará determinante que los diseños presten atención a los efectos de cargas electrónicas individuales.

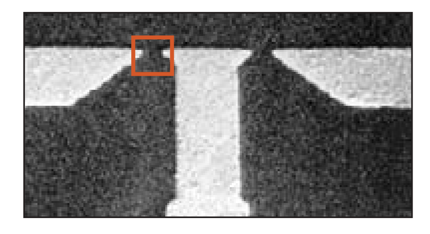
En 1987, los progresos en nanofabricación permitieron a Theodore A. Fulton y Gerald J. Dolan, de los Laboratorios Bell, fabricar el primer transistor monoelectrónico El efecto de carga monoelectrónica observado por ellos, hoy denominado "efecto de bloqueo culombiano", se ha visto desde entonces en una amplia gama de estructuras. Conforme se va reduciendo el tamaño de los dispositivos experimentales, el bloqueo culombiano pierde su carácter de excepción para convertirse en regla en los dispositivos nanoescalares débilmente acoplados. Así se observa sobre todo en experimentos donde se hacen pasar corrientes eléctricas a través de moléculas individuales. Estas moléculas pueden actuar como islotes culombianos en virtud de su débil acoplamiento a los electrodos conducentes de vuelta al macromundo. Uno de los retos importantes en el nuevo campo de la electrónica molecular estriba en aplicar dicho efecto para obtener acoplamientos robustos y reproducibles a moléculas pequeñas.

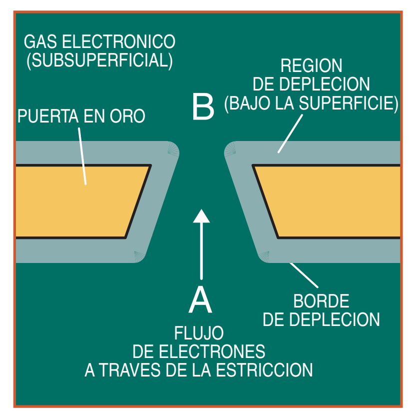
Tal era en 1990 el telón de fondo. Me encontraba yo por entonces en Bell Communications Research, estudiando el transporte de electrones en semiconductores mesoscópicos. En un proyecto paralelo, Larry Schiavone y Axel Scherer, colegas míos, y yo, empezamos conjuntamente a desarrollar técnicas que —esperábamos— contribuyeran a elucidar la naturaleza cuántica del flujo del *calor*. El trabajo requería nanoestructuras mucho más refinadas y complejas que los dispositivos planares utilizados en la investigación de la electrónica mesoscópica. Nos hacían falta dispositivos en suspensión libre, estructuras que poseyeran pleno relieve tridimensional. ¡Bendita ignorancia! No tenía ni idea de que los experimentos iban a ser tan intrincados, que su realización exigiría casi diez años.

Los primeros pasos de importancia se dieron al poco de trasladarme al Caltech en 1992, en una colaboración con John Worlock, de la Universidad de Utah, y dos sucesivos becarios posdoctorales de mi grupo. Thomas Tighe desarrolló los métodos y dispositivos que generaron las primeras mediciones directas del flujo calorífico en nanoestructuras. Keith Schwab revisó,

PASO A PASO

LA CUANTIZACION DE LA CONDUCTANCIA ELECTRICA





En 1987, el equipo encabezado por Bart J. van Wees, de la Universidad Politécnica de Delft y los Laboratorios de Investigación Philips, construyeron una estructura inédita (*microfotografía*) que revelaba una ley básica de los circuitos de la nanotécnica. Sobre un sustrato semiconductor (*fondo de color oscuro*) depositaron electrodos-puerta de oro (*zonas brillantes*). En el seno del sustrato, a unos 100 nanómetros por debajo de su superficie, se creó una lámina planar de portadores de carga, que recibe el nombre de gas electrónico bidimensional. Las puertas y el gas actuaban como las armaduras de un condensador.

Al aplicar a las puertas una tensión de polarización negativa, los electrones del gas situados bajo las puertas o alrededor de su periferia eran compelidos a desplazarse (situación representada en el diagrama). Al aumentar la polarización negativa, el "contorno de depleción" se vuelve más pronunciado. Alcanzado cierto valor umbral, los portadores de carga de cada lado de la estricción (*entre los puntos A y B*) llegaban a separarse, y la conductancia a través del dispositivo era nula. Al invertir el proceso desde el umbral, no se restauraba la conductancia de un modo suave y continuo, sino por saltos, produciéndose los pasos en valores determinados por el doble del cuadrado de la carga del electrón dividida por la constante de Planck. Esta razón recibe el nombre de cuanto de conductancia eléctrica; indica que la corriente eléctrica fluye en los nanocircuitos según tasas cuantizadas.

luego, el diseño de las nanoestructuras en suspensión e instaló instrumentación superconductora ultrasensible con el fin de interrogarlas a temperaturas ultrabajas, a las cuales los efectos eran apreciables con mayor claridad.

A finales del verano de 1999, Schwab observaba, por fin, el flujo de calor a través de nanopuentes de nitruro de silicio. En esos primeros datos hizo aparición el límite fundamental al flujo calorífico en estructuras mesoscópicas. La manifestación de este efecto de "cuanto de conductancia térmica" determina la tasa máxima con la que puede transportarse el calor por una vibración mecánica singular y ondulomorfa que se extienda desde la entrada a la salida de un dispositivo nanométrico. El cuanto de conductancia térmica se asemeja al cuanto de conductancia eléctrica, pero gobierna el transporte de calor.

Este cuanto constituye un parámetro importante para la nanoelectrónica; representa el límite infranqueable para el problema de disipación de energía. En breve, todos los dispositivos "activos" exigen algo de energía para funcionar; para que funcionen establemente sin sobrecalentamiento hemos de diseñar un procedimiento que extraiga el calor disipado. Al tiempo que los ingenieros se esfuerzan en elevar sin cesar la densidad de integración de transistores y las frecuencias de reloj de los microprocesadores, el problema de la refrigeración de los microcircuitos para evitar el fallo total del sistema cobra proporciones monumentales. Este problema se exacerbará en la nanotécnica.

Feynman, que tuvo también en cuenta esta complejidad, afirmó: *"Que giren en seco los cojinetes; no se recalentarán, porque el calor escapa muy, muy rápidamente, de un dispositivo tan pequeño."* Pero nuestros experimentos indican que la naturaleza es un poco más restrictiva. El cuanto de conductancia térmica puede imponer límites a la eficacia disipadora de calor en un dispositivo muy pequeño. Lo que Feynman imaginaba sólo puede ser correcto si el ingeniero diseña sus estructuras atendiendo a tales limitaciones.

De los tres ejemplos anteriores hemos de sacar una conclusión: estamos apenas empezando a desvelar las formas maravillosamente complejas y peculiares en que se comportan los sistemas nanoescalares. El descubrimiento de los cuantos de conductancia térmica y eléctrica, con la observación del bloqueo culombiano, constituyen auténticas discontinuidades, cortes abruptos en nuestro conocimiento.

La cuantización de las conductancias eléctrica y térmica y los fenómenos de transferencia monoelectrónica de carga se cuentan entre las reglas universales de nanodiseño. Son leyes nuevas del nanomundo; no contravienen, sino que amplían y aclaran parte de la intuición de Feynman: *"Encontramos, a nivel atómico, fuerzas y posibilidades de nuevas clases, nuevas clases de efectos. Los problemas de manufactura y reproducción de materiales serán completamente diferentes."*

Ventaja y ruina de lo nano

En el dominio de la técnica nanométrica *no* vale todo; existen *leyes*. Voy a tomar dos ilustraciones concretas del campo de los sistemas nanoelectromecánicos (SNEM), al que me dedico en la actualidad.

Parte de mi investigación ambiciona poner pequeños dispositivos mecánicos al servicio de aplicaciones de detección y telemetría. Las estructuras nanoescalares ofrecen posibilidades revolucionarias; cuanto menor es un dispositivo, tanto más alterables son sus propiedades físicas. Pensemos en los detectores por resonancia, que suelen utilizarse en la detección o telemetría de masas. Las vibraciones de un elemento diminuto, como las de un pequeño fleje o voladizo, se hallan en última instancia ligadas a la masa de ese elemento, por lo que la adición de una minúscula cantidad de material extraño (la "muestra" sometida a ponderación) perturbará la frecuencia de resonancia. Kamil Ekinci, de mi laboratorio, ha demostrado que los dispositivos nanoescalares pueden alcanzar una sensibilidad tal, que resulta posible "pesar" átomos o moléculas uno a uno.

Pero la moneda tiene dos caras. Los átomos y moléculas de gas se adsorben y desadsorben sin cesar de las superficies del dispositivo. Si éste es macroscópico, la fracción de cambio de masa resultante será despreciable. Ahora bien, tal cambio sí puede resultar apreciable para estructuras nanoescalares. Los gases que llegan a un detector resonante pueden alterar aleatoriamente la frecuencia de resonancia. Al parecer, cuanto menor sea el dispositivo, menor será su estabilidad. Dicha inestabilidad puede suponer un auténtico engorro para ciertas aplicaciones futurísticas de procesamiento electromecánico de señal. Es posible que se consiga eludir el problema utilizando, por ejemplo, arreglos de dispositivos nanomecánicos, para promediar sus fluctuaciones. Para los elementos individuales, el problema parece, sin embargo, ineludible.

Un segundo ejemplo de que "no todo vale" en el nanomundo guarda mayor relación con la economía. Es consecuencia de los niveles energéticos inherentemente ultrabajos a los que operan los dispositivos mecánicos nanométricos. La física impone un umbral para la energía mínima de funcionamiento: las vibraciones térmicas, aleatorias y ubicuas de todo dispositivo mecánico asignan un "ruido basal" por debajo del cual resulta cada vez más difícil discernir las señales. En la práctica, los dispositivos nanomecánicos se excitan de forma óptima por señales de mil a un millón de veces mayores que este umbral. Aun así, tales niveles son todavía de una millonésima a una milmillonésima parte de la potencia utilizada en los transistores comunes.

La ventaja futura, en algún posible sistema mecánico nanométrico de procesamiento de señal, o en alguna computadora, es que un millón de elementos nanomecánicos no disiparían, en promedio, más allá de un microwatt. Tales sistemas de consumo ínfimo podrían llevar a una amplia proliferación y distribución de sensores ultraminiatura, "inteligentes" y baratos, capaces de supervisar sin cesar la totalidad de las funciones de importancia en hospitales, plantas de manufactura, aviones y demás. Resulta sumamente atractiva la idea de contar con dispositivos ultradiminutos que vayan drenando con extrema lentitud sus fuentes de alimentación, en particular si cuentan con suficiente potencia computacional para funcionar de modo autónomo.



3. RICHARD FEYNMAN predijo el nacimiento de la nanotécnica en una conferencia histórica pronunciada en Caltech en 1959. Feynman afirmaba que "los principios de la física no niegan la posibilidad de maniobrar objetos átomo a átomo". Pero Feynman previó también la vigencia de leyes físicas peculiares, que ahora comienzan a descubrirse.

Pero también en este caso tiene dos caras la moneda. Los regímenes de consumo ultrabajo son totalmente ajenos a la electrónica de nuestros días. Los dispositivos nanoescalares van a exigir sistemas con arquitecturas de nuevo cuño, compatibles con umbrales energéticos asombrosamente bajos. No es probable que esta perspectiva sea felizmente recibida por la industria de material informático, que ha efectuado abrumadoras inversiones en los dispositivos y procedimientos actuales. Una planta nueva de procesamiento de semiconductores cuesta hoy más de un millardo de euros, y es probable que, para ser útil, hubiera que reequiparla. Aun así, estoy seguro de que las revolucionarias perspectivas que ofrecen los dispositivos nanoescalares acabarán imponiendo tales cambios.

Problemas monumentales

Sin duda, habrá que resolver un buen número de problemas que asoman ya por el horizonte antes de materializar las posibilidades que ofrecen los dispositivos nanoescalares. Aunque cada campo de investigación tiene sus propias preocupaciones, toman cuerpo ciertos temas generales. Así, por ejemplo, dos problemas de importancia fundamental en mi trabajo actual sobre sistemas mecánicos nanométricos revisten interés para la nanotécnica en general:

Problema 1: Comunicación entre el nanomundo y el macromundo. Los SNEM son increíblemente pequeños; sus movimientos pueden ser mucho menores aún. Un fleje nanoescalar anclado por ambos extremos vibra con mínima distorsión armónica cuando la amplitud de su vibración se mantiene menor que una pequeña fracción de su

espesor. En el caso de una barra de 10 nanómetros de espesor, esta amplitud es de sólo uno o dos nanómetros. La construcción de los transductores de alta eficiencia necesarios para transferir información desde un tal dispositivo al macromundo entraña la lectura de información con precisión todavía mayor.

Para complicar el problema, la frecuencia natural de vibración aumenta al reducir el tamaño de la barra. Así pues, para traducir las vibraciones del dispositivo, el transductor SNEM ideal debe resolver desplazamientos mínimos, en el intervalo del picómetro al femtómetro, con muy grande anchura de banda (hasta alcanzar la banda de las microondas). Este doble requisito plantea una dificultad descomunal, un obstáculo mucho más importante que los afrontados hasta ahora en la investigación sobre SMEM. Por si fuera poco, la mayoría de las metodologías correspondientes a los SMEM son inaplicables. La reducción de escala hasta dimensiones nanométricas no funciona.

Estas dificultades de comunicación entre el nanomundo y el macromundo constituyen un problema genérico en el desarrollo de la nanotécnica. En última instancia, ésta dependerá de que puedan establecerse vías de transferencia robustas, bien diseñadas y construidas a partir de lo que, en esencia, son macromoléculas. Aunque la imaginación nos presente nanorrobots autoprogramados que sólo necesitan instrucciones desde el macromundo al ser cargados de energía y arrancados por primera vez, parece más verosímil que la mayoría de las aplicaciones nanotécnicas realizables conlleven alguna forma de información al macromundo. El problema de la comunicación seguirá siendo decisivo.

La orquestación de tal comunicación invoca de inmediato la muy real posibilidad de daños colaterales. La teoría cuántica nos dice que el proceso de medición de un sistema cuántico casi siempre lo perturba. Lo cual puede seguir siendo cierto al subir de escala, pasando desde los átomos y moléculas a nanosistemas que comportan millones o millardos de átomos. Al acoplar un nanosistema a sondas que informen al macromundo casi siempre se modifican en cierto grado las propiedades del nanosistema. La introducción de los transductores requeridos para la comunicación no se limitará a aumentar el tamaño y la complejidad del nanosistema. Habrá de extraer del sistema algo de energía para efectuar mediciones, y podría degradar el rendimiento del nanosistema. La medición ha tenido siempre un costo.

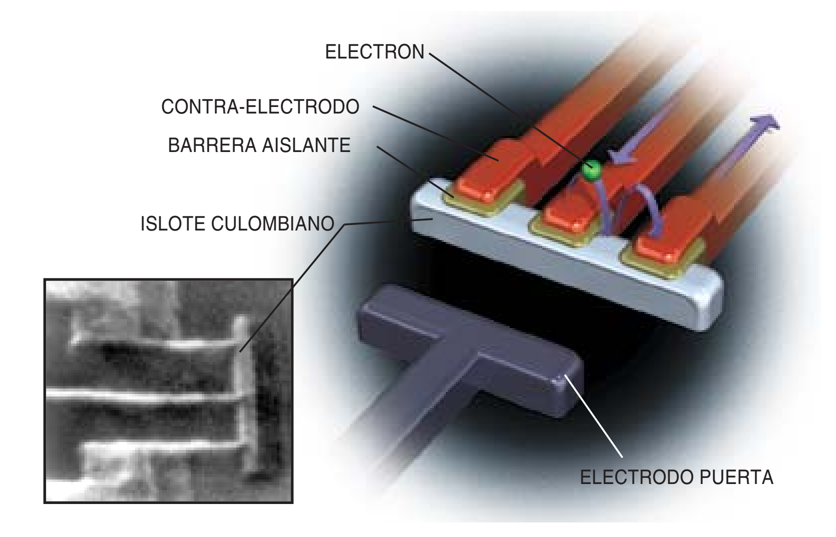
Problema II: Superficies. En la contracción de los SMEM a SNEM, la física de los dispositivos depende de modo creciente de los fenómenos superficiales. La física del estado sólido se funda en buena parte sobre la premisa de que la razón de superficie a volumen de los dispositivos es infinitesimal, lo

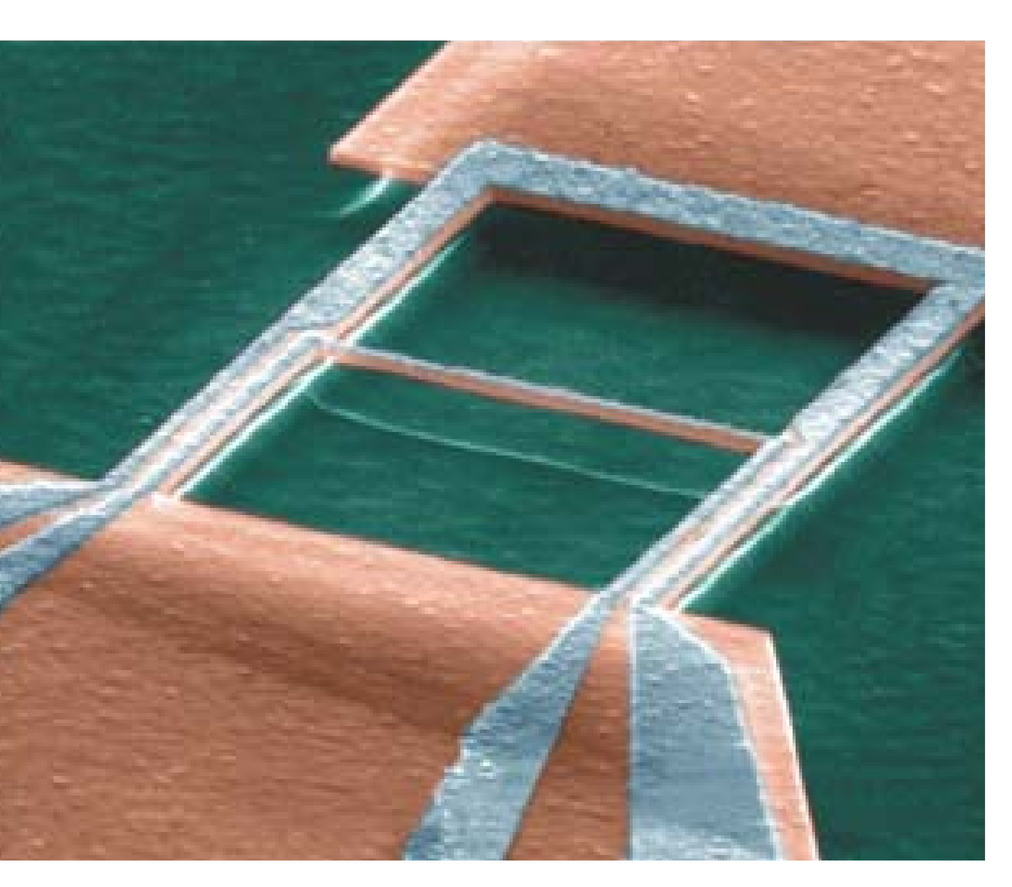
TOMANDO CARGA

MONOELECTRONICA

Los progresos en nanofabricación permitieron en 1987 a Theodore A. Fulton y Gerald J. Dolan la construcción de un transistor monoelectrónico en los Laboratorios Bell (*microfotografía*). En esta estructura se consiguió por vez primera el movimiento controlado de electrones solitarios a través de un nanodispositivo. La pieza central es un islote culombiano, consistente en un electrodo metálico aislado de sus contraelectrodos por barreras muy delgadas de óxido no conductor (*diagrama*). Los contraelectrodos llevaban hasta la instrumentación macroescalar del laboratorio, utilizada para ejecutar los experimentos. A poca distancia del islote, separado por un estrecho vano, se encontraba el electrodo "puerta" (representado en el diagrama, pero no visible en la foto), que permitía el control directo de la carga introducida en el islote. La corriente fluía a través del dispositivo desde uno de los contraelectrodos hasta el otro, como en un circuito ordinario, pero aquí estaba limitada por los saltos individuales de electrones entrantes y salientes del islote culombiano.

Los experimentos de Fulton y Dolan demuestran tanto los aspectos físicos fundamentales de la transferencia de electrones individuales como las posibilidades de estos dispositivos para servir de electrómetros ultrasensibles: instrumentos que detectan cargas electrónicas individuales. Los circuitos capaces de conmutar electrones de uno en uno podrían llegar algún día a constituir la base de una nanoelectrónica de clase enteramente nueva. Sin embargo, el advenimiento de tal electrónica "singular" presagia también problemas.





4. ESTE AMPLIFICADOR NANOMECANICO logra vencer el engorroso problema de la comunicación con el macromundo amplificando 1000 veces fuerzas muy débiles. Dos puentes en voladizo (*a la izquierda y a la derecha*) del monocristal de carburo de silicio soportan el travesaño central, al que se aplica la fuerza señal. Unos electrodos de película delgada (*en plata*) superpuestos a estas estructuras proporcionan lecturas muy sensibles de movimientos nanométricos.

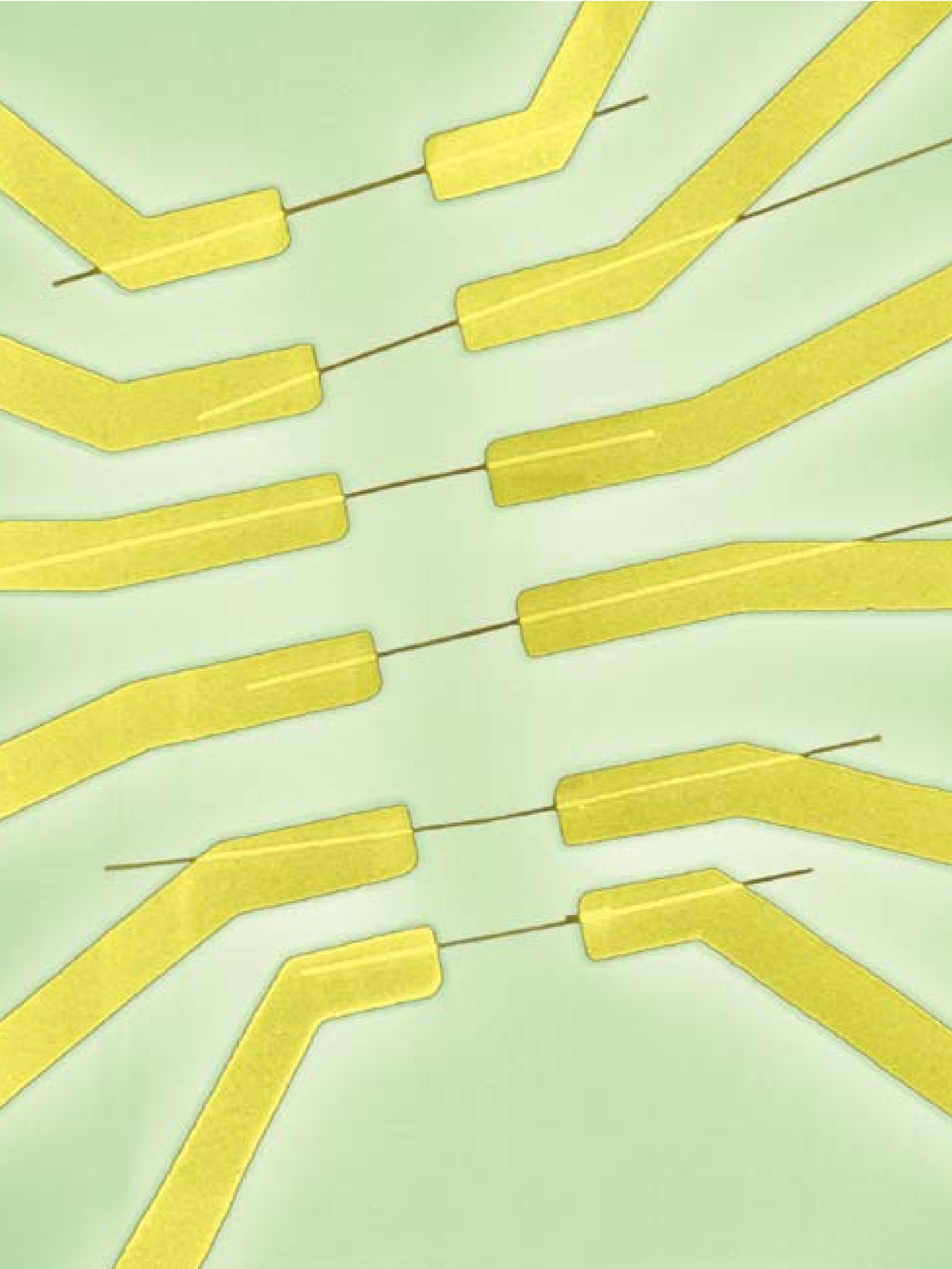
que entraña que las propiedades físicas están siempre dominadas por la física de lo macizo. Los sistemas nanoescalares son tan pequeños, que esta hipótesis se viene abajo.

Por ejemplo, los dispositivos mecánicos configurados a partir de materiales ultrapuros y monocristalinos pueden contener sólo muy pocos defectos cristalográficos o impurezas, si alguno. Mi esperanza inicial era que, como resultado, en los SNEM monocristalinos se produciría sólo una amortiguación muy débil de las vibraciones mecánicas. Pero al ir reduciendo el tamaño de los dispositivos mecánicos, encontramos que las pérdidas de energía sonora aumentan en proporción a la razón superficie/volumen, que es cada vez mayor. Este resultado implica a las superficies en los procesos de pérdida de energía vibratoria de los dispositivos. En la más perfecta barrita de silicio que pueda construirse, que mide 10 nanómetros de diámetro y 100 nanómetros de longitud, más del 10 por ciento de los átomos se encuentran en la superficie o en su inmediatez. Es evidente que estos átomos desempeñarán un papel central; mas, para comprender exactamente cuál, hará falta un esfuerzo de investigación importante y sostenido.

En este contexto, las llamadas estructuras nanotubulares, anunciadas hace poco, parecen ideales. Un nanotubo es un material cristalino similar a una barra, perfecto para construir las diminutas estructuras vibrantes que son de nuestro interés. Y dado que carecen en toda su longitud de grupos químicos que sobresalgan al exterior, se podría esperar que en sus superficies fuese mínima la interacción con materiales “foráneos”. Al parecer no es así. Aunque los nanotubos exhiben características ideales en el seno de ambientes prístinos, de ultraalto vacío, en condiciones más ordinarias, expuestos al aire o al vapor de agua, evidencian propiedades eléctricas marcadamente diferentes. Es verosímil que sus propiedades mecánicas presenten una sensibilidad similar. Así pues, las superficies decididamente sí tienen importancia. Al parecer no existe la panacea.

Los científicos se mueven por la esperanza de la gloria. Ya Kekulé dijo en una ocasión: “Aprendamos a soñar, caballeros, y tal vez entonces hallemos la verdad... Pero cuidemos de publicar nuestros sueños antes de que hayan sido puestos a prueba por la luz de la vigilia”. Palabras sin duda válidas para nuestro dominio. Parece que cada vez que logramos acceder a un régimen que es diferente en un factor 10 —y presumiblemente “mejor”— ocurren dos cosas. Primero, que aflora algún fenómeno científico imprevisto y maravilloso. Y enseguida aparece toda una cohorte de problemas subyacentes, espinosos e igualmente imprevistos. Esta regla ha venido siendo cierta mientras nos esforzábamos en reducir el tamaño, aumentar la sensibilidad, lograr mayor resolución espacial, conseguir campos magnéticos o eléctricos más intensos, presiones o temperaturas cada vez más bajas, y así sucesivamente.

Los sistemas complejos suelen ser exquisitamente sensibles a una miríada de parámetros que escapan a nuestra capacidad de percepción y registro —y no digamos, a nuestro control— con suficiente regularidad y precisión. Los científicos han estudiado la materia, y en gran parte la han comprendido ya, hasta las partículas fundamentales que componen los neutrones, los protones y los electrones, objetos de crucial importancia para químicos, físicos e ingenieros. Pero todavía no podemos predecir determinísticamente cómo se comportarán en masa los ensamblajes arbitrariamente complejos de estos tres componentes fundamentales.



Nanocircuitos

Se han construido ya nanotransistores y filamentos nanométricos. Falta encontrar ahora la manera de ensamblarlos

Charles M. Lieber

¿Es realmente necesario seguir reduciendo el tamaño de los circuitos? La miniaturización de la microelectrónica de silicio parece tan inexorable, que la pregunta rara vez se plantea. En nuestros días, un microprocesador puntero tiene más de 40 millones de transistores; hacia 2015, tal número podría rondar los 5000 millones. Pero en el plazo de unos 20 años estos impresionantes avances se van a topar con limitaciones de índole científica, técnica y económica. Una primera reacción podría ser: ¿Y qué? ¿Acaso no son suficientes ya 5000 millones de transistores?

Quizá cuando nos hallemos ante esos límites pensemos de otra manera y queramos rebasarlos. Quienes trabajamos para que aumente la potencia computacional actuamos movidos, en parte, por el puro desafío del descubrimiento y conquista de nuevos territorios. Nos percatamos también de las revolucionarias posibilidades para la medicina y otras muchas ciencias, dado que la miniaturización llevada al extremo permite formas de interacción entre personas y máquinas no posibles con los medios técnicos existentes hoy.

EN LOS NANOFILAMENTOS, cada uno de 4 a 10 nanómetros de diámetro, podría encerrarse el futuro de la electrónica. Son las líneas de fosfuro de indio (*de color marrón*), que en esta microfotografía conectan los electrodos dorados. Tales filamentos han recibido ya diversos usos: en memorias, en funciones lógicas y en matrices de diodos fotoemisores (led).

Como el propio término sugiere, en microelectrónica las dimensiones de los componentes rondan en torno a una micra de lado (últimamente se han reducido hasta rondar los 100 nanómetros). Trascender la microelectrónica entraña más que la mera reducción de 10 a 1000 veces en las dimensiones de los componentes: conlleva también un desplazamiento de paradigma en nuestra forma de concebir el ensamblaje de las distintas piezas.

Tanto la micro como la nanoelectrónica abarcan tres niveles de organización. El elemento constructivo básico reside en el transistor o su nanoequivalente: un interruptor capaz de permitir o impedir el paso de una corriente eléctrica, así como de amplificar señales. Los transistores, en microelectrónica, se construyen con materiales semiconductores; materiales, como el silicio impuro, que pueden manipularse para que alternen entre los estados de conducción y de no conducción. En nanoelectrónica, los transistores podrían fabricarse con moléculas orgánicas o con estructuras inorgánicas nanoescalares.

El siguiente nivel de organización corresponde al de interconexión, al sistema de líneas conductoras que vinculan entre sí a los transistores con el fin de que realicen operaciones lógicas o aritméticas. En microelectrónica, las líneas de conexión suelen ser tiras metálicas depositadas sobre el silicio, con anchuras comprendidas entre centenares de nanómetros y varias micras. En nanoelectrónica, los conductores

El autor

CHARLES M. LIEBER ocupa la cátedra Mark Hyman de química en la Universidad de Harvard, donde dirige a un grupo de 25 investigadores entre posdoctores, doctorandos y alumnos de licenciatura, que se concentran en la nanotécnica y sus principios. Con Larry Bock y Hongkun Park ha fundado NanoSys, Inc.

son nanotubos o filamentos de otros tipos, cuya delgadez puede llegar al nanómetro.

En el nivel superior encontramos la "arquitectura", es decir, la forma general en que están interconectados los transistores, de modo que el circuito pueda insertarse en un ordenador o en otro equipo cualquiera, y operar con independencia de los detalles de nivel más bajo. Los investigadores en nanoelectrónica no acaban de llegar al punto de poder ensayar arquitecturas de diversos tipos, pero sí saben de qué capacidades podrán sacar provecho y cuáles son los puntos débiles que deberán compensar.

En otros aspectos, sin embargo, difícilmente podrían la micro y la nanoelectrónica parecerse menos. El paso de una a otra va a exigir el abandono de la manufactura "de arriba abajo" y la aplicación de una metodología "de abajo arriba". En nuestros días, para la construcción de un microcircuito de silicio, las plantas de fabricación parten de un cristal de silicio, definen las configuraciones deseadas mediante una técnica fotolitográfica y eliminan después el material sobrante por ataque con ácidos o con plasma. Tales métodos carecen de la precisión necesaria para dispositivos cuya anchura es de meros nanómetros. Por eso los investigadores se valen de métodos de síntesis química para producir bloques constructivos por moles (6×10^{23} piezas) y ensamblar una porción de ellos en estructuras de tamaño creciente. Los progresos conseguidos hasta ahora han sido impresionantes. Pero si esta investigación fuese una escalada al monte Everest, apenas si acabamos de llegar al campamento base.

Resumen/Nanoelectrónica

- Chips de silicio, tarjetas de circuitos, estaño de soldar: tales son los iconos de la electrónica moderna. La electrónica del futuro, en cambio, se asemejará a un equipo de química. Las técnicas tradicionales no pueden reducir indefinidamente el tamaño de los circuitos; pronto serán necesarios unos métodos nuevos de organizar y ensamblar los elementos electrónicos. Tal vez llegue el día en que podamos crear un ordenador en un alambique.
- Se han obtenido componentes electrónicos nanoescalares (transistores, diodos, relés, puertas lógicas) a partir de moléculas orgánicas, nanotubos de carbono y filamentos semiconductores. El problema estriba ahora en ensamblar entre sí todos estos componentes.
- A diferencia del diseño de circuitos habitual, en el que, a partir de esquemas y planos, se preparan las máscaras fotolitográficas y se opera sobre los chips, el diseño de nanocircuitos partirá probablemente del chip —un revoltijo más o menos aleatorio que contendrá unos 10^{24} componentes e hilos, muchos de los cuales ni siquiera funcionan. Irá gradualmente esculpiéndolo hasta lograr un dispositivo útil.

Máquinas de empequeñecer

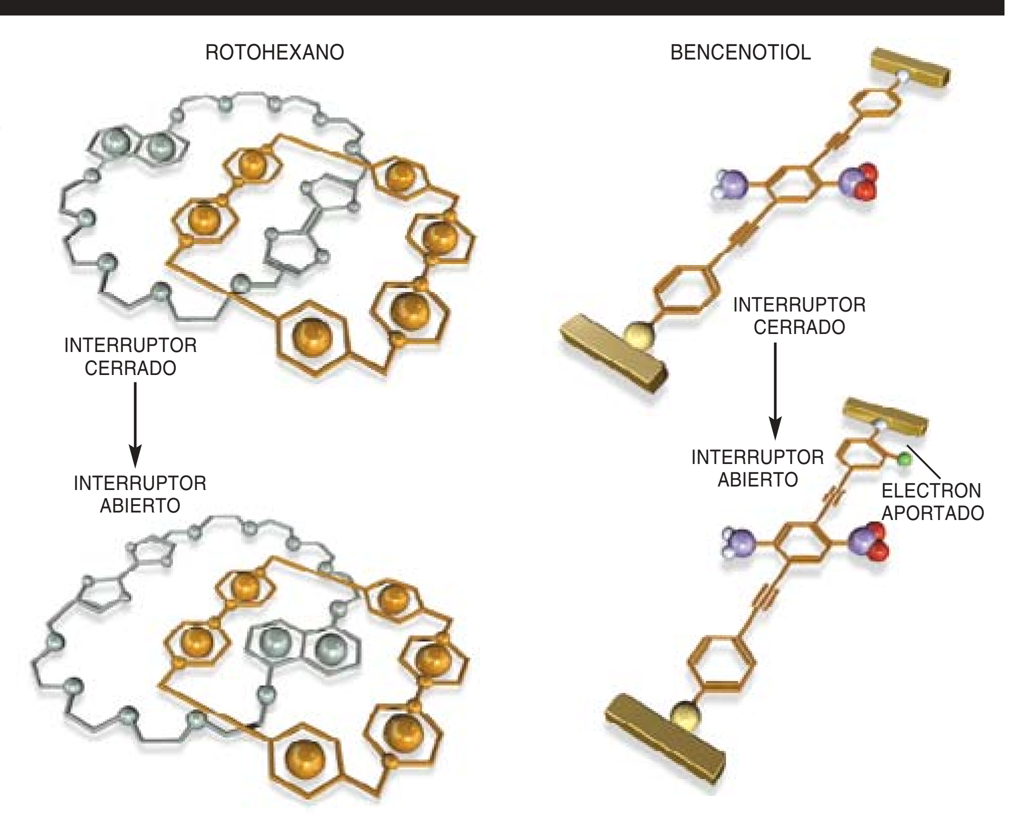
Hace más de un cuarto de siglo, Avi Aviram, de IBM, y Mark A. Ratner, de la Universidad del Noroeste, propusieron, en un artículo seminal, utilizar moléculas para la constitución de dispositivos electrónicos. Avanzaban que mediante la "confección a la medida" de las estructuras atómicas de ciertas moléculas orgánicas se crearían cuasitransistores. Sus ideas, empero, permanecieron en el campo teórico hasta que hace poco una confluencia de progresos en química, en física y en ingeniería ha permitido llevarlas a la práctica.

Entre todos los grupos que han hecho realidad las ideas de Aviram y Ratner, destacan dos equipos: uno de la Universidad de California en Los Angeles (UCLA), junto con Hewlett-Packard; el otro, en las universidades de Yale, Rice y Pennsylvania. En el curso del pasado año, ambos grupos demostraron que miles de moléculas apiñadas estrechamente pueden transportar electrones desde un electrodo metálico hasta otro. Cada molécula tiene unos 0,5 nanómetros de anchura y al menos 1 nanómetro de longitud. Han demostrado también que estos cúmulos moleculares pueden comportarse como interruptores (tienen dos estados, conducción y bloqueo), con posible aplicación en memorias de ordenador; una vez en estado de paso, permanecen en él unos 10 minutos [*véase* "Computación molecular", por Mark A. Reed y James M. Tour, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2000]. Quizá no parezca mucho tiempo, pero la memoria "volátil" de los ordenadores pierde su información instantáneamente al apagar el equipo; e incluso estando encendido, la información almacenada sufre pérdidas y es preciso "refrescarla" cada 0,1 segundos, más o menos.

Aunque los detalles difieren, se cree que el mecanismo de conmutación hace intervenir en ambos tipos de moléculas una reacción química bien conocida, la de oxidación/reducción, donde los electrones se desplazan y redistribuyen en el seno de la molécula. La reacción imprime una torsión a la molécula, bloqueando a los electrones al igual que al aplastar una manguera se corta el flujo de agua. En la posición de paso, los cúmulos moleculares pueden conducir la electricidad hasta 1000 veces mejor que en la posición de corte. Esta razón de conductancias es, a decir verdad, bastante pequeña si la comparamos con la de los transistores típicos, cuya conductancia varía millones de veces. Se bus-

NANOTRANSISTORES

LOS TRANSISTORES moleculares podrían ser los bloques constructivos de la electrónica nanométrica. Cada una de las dos moléculas aquí representadas conduce la electricidad, como si de un filamento finísimo se tratara, en cuanto una reacción de oxidación reducción altera su configuración atómica y la convierte en un interruptor cerrado. En el diagrama, cada varilla representa un enlace químico; cada intersección de dos varillas, un átomo de carbono, y cada bola, un átomo que no es carbono.



can ahora otras moléculas con mejores propiedades de conmutación y se trabaja, asimismo, la investigación en torno al proceso de conmutación propiamente dicho.

Mi grupo de investigación, con sede en la Universidad de Harvard, es uno de los que se han concentrado en filamentos inorgánicos largos y delgados, no en las moléculas orgánicas. Tenemos el mejor ejemplo en el nanotubo de carbono, cuyo diámetro típico ronda unos 1,4 nanómetros [*véase* "Introducción de los nanotubos en el dominio de la electrónica", por Philip G. Collins y Phaedon Avouris, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2001]. Estos filamentos conductores nanoescalares no sólo pueden conducir mucha más corriente, átomo por átomo, que los hilos metálicos habituales, sino que pueden también operar como diminutos transistores. Funcionan lo mismo en modo pasivo (interconexiones) que en modo activo (interruptores). Otra ventaja es que pueden sacar partido de los mismos principios físicos en que se basa la microelectrónica estándar de silicio, con lo que resultan más sencillos de comprender y manipular.

En 1997, el grupo de Cees Dekker, radicado en la Universidad Politécnica de Delft, y el grupo de Paul L. McEuen, entonces en la Universidad de California en Berkeley, informaron separada e independientemente de transistores de alta sensibilidad construidos con nanotubos de carbono metálico. Estos dispositivos podían ser conmutados por electrones individuales, pero su funcionamiento requería temperaturas muy bajas. El equipo de Dekker consiguió vencer este inconveniente el pasado mes de julio. Se sirvieron de un microscopio de fuerza atómica para crear un transistor monoelectrónico con posibilidad de funcionar a temperatura ambiente. El grupo de Dekker ha puesto a punto un transistor de efecto de campo más tradicional (el componente fundamental de la mayoría de los circuitos integrados actuales) a partir de un nanotubo de carbono. El grupo de McEuen ha combinado nanotubos de tipo metálico y de tipo semiconductor para formar un diodo, un dispositivo que permite el paso de corriente sólo en una dirección. Por último, mi grupo ha presentado un conmutador de tipo muy diferente, un relé electromecánico de escala nanométrica.

Línea caliente

Uno de los principales problemas que plantean los nanotubos es lograr su uniformidad. Dado que una ligera variación de diámetro puede suponer la diferencia entre un nanotubo conductor y uno semiconductor, resulta que en un gran lote puede haber sólo unos pocos dispositivos aptos. En abril de este año, Phaedon Avouris y sus colegas, del Centro Thomas J. Watson de IBM, dieron con una solución. Partieron de una mezcla de nanotubos conductores y

semiconductores y, por aplicación de una corriente eléctrica entre electrodos metálicos, quemaron selectivamente los que eran conductores, hasta dejar sólo los semiconductores. Se trata, sin embargo, de una solución parcial, pues debe recurrirse a la litografía para montar la formación aleatoria de nanotubos y después ensayar y modificar cada uno de los elementos individuales, que en última instancia se contarían por miles de millones.

Mi grupo ha venido trabajando en un filamento nanoescalar novedoso, el nanofilamento semiconductor. Aunque de tamaño semejante al de un nanotubo de carbono, su composición es más fácil de controlar con precisión. Para sintetizar estos filamentos partimos de un catalizador metálico, que define el diámetro del hilo en crecimiento y sirve de guía sobre la que tienden a reunirse las moléculas del material deseado. Conforme van creciendo los

Computación con ADN

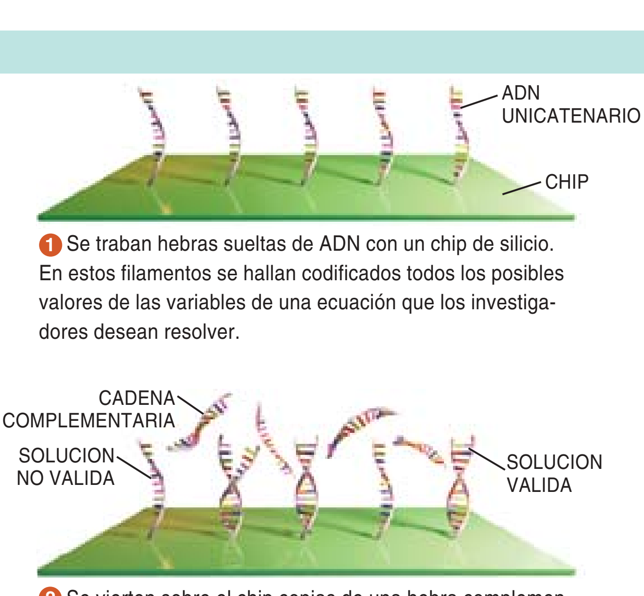
¿Por qué limitarnos a la electrónica? Casi todos los esfuerzos encaminados a reducir el tamaño de las máquinas de cómputo dan por hecho que éstas van a seguir, en gran medida, funcionando sirviéndose de electrones para trasladar la información y de transistores para procesarla. Sin embargo, una computadora nanoescalar podría fundarse en medios distintos. Una de las posibilidades más apasionantes consiste en sacar partido del ADN, el portador de la información genética en los seres vivos.

La molécula de la vida puede almacenar vastas cantidades de datos en sus secuencias de cuatro bases (adenina, guanina, timina y citosina). Las enzimas naturales manipulan tal información con muy alto grado de paralelismo. La potencia de los métodos basados en ADN fue puesta de manifiesto por Leonard M. Adleman en 1994, quien demostró que una computadora fundada en ADN podía resolver un tipo de problema que resulta especialmente difícil con las computadoras ordinarias, a saber, el problema del grafo hamiltoniano, emparentado con el famoso problema del viajante [*véase* "Computación con ADN," por Leonard M. Adleman, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1998].

Adleman comenzó creando una disolución química de ADN. Las moléculas individuales de ADN codificaban cada posible ruta que conectaba dos puntos. Mediante una serie de pasos de separación y amplificación, Adleman fue eliminando los caminos erróneos —los que contenían puntos que no deberían— hasta lograr aislar el camino correcto. Más recientemente, el grupo de Lloyd M. Smith, de la Universidad de Winconsin en Madison, llevó a la práctica un algoritmo similar utilizando chips de genes, que pueden prestarse mejor a la computación práctica (*diagrama*).

A pesar de las ventajas de la computación con ADN para problemas no tratables por otros métodos, son muchas las dificultades que subsisten, entre ellas, la elevada incidencia de errores provocada por emparejamientos erróneos de bases y por el inmenso número de nanoelementos de ADN necesarios, por modesto que sea el cómputo. Es posible que la computación con ADN acabe fundida con nanoelectrónica de otros tipos, sacando partido de la integración y la detección que permiten los filamentos nanoescalares y los nanotubos.

—C.M.L.

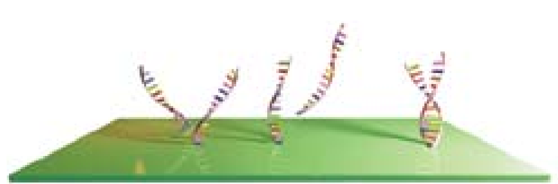


1 Se traban hebras sueltas de ADN con un chip de silicio. En estos filamentos se hallan codificados todos los posibles valores de las variables de una ecuación que los investigadores desean resolver.

2 Se vierten sobre el chip copias de una hebra complementaria, en el que se ha codificado la primera cláusula de una ecuación. Estas copias se emparejan con cualquier hebra que represente una solución válida de la cláusula. Las soluciones no válidas siguen formando una hebra desemparejada.



3 Una enzima elimina todas las hebras solitarias.



4 Otros procesos suprimen las hebras complementarias añadidas. Se itera el proceso con todas las cláusulas de la ecuación.



5 La hebra de ADN que sobrevive a todo el proceso representa la solución de la ecuación completa.

nanofilamentos, les son incorporados dopantes químicos (impurezas que aportan o retiran electrones), controlando de este modo si los nanofilamentos son de tipo *n* (con electrones supernumerarios) o de tipo *p* (deficitarios en electrones, o lo que es equivalente, excedentarios en "huecos" dotados de carga positiva).

La disponibilidad de materiales de tipos *n* y *p*, que son ingredientes esenciales de los transistores, de los diodos y de otros dispositivos electrónicos, nos ha abierto las puertas de un mundo nuevo. Hemos ensamblado una amplia gama de dispositivos, entre ellos, los dos principales tipos de transistores (los de efecto de campo y los bipolares); inversores, que transforman una señal "0" en "1"; y diodos fotoemisores ("leds"), que abren el camino para enlaces ópticos. Nuestros transistores bipolares fueron los primeros dispositivos de escala molecular en amplificar una corriente. En nuestro laboratorio, Xiangfeng Duan ha dado un paso más con el ensamblaje de memoria por entrecruzamiento de nanofilamentos de tipos *n* y *p*. Esta memoria almacena información durante 10 minutos o más, atrapando carga en la interfaz entre los nanofilamentos que se cruzan.

Romper el atasco

La construcción de un arsenal de dispositivos de escala molecular o nanométrica es tan sólo el primer peldaño. El nudo gordiano se hallará, a buen seguro, en la interconexión e integración de tales dispositivos. En primer lugar, deberán conectarse los dispositivos nanométricos a filamentos de escala molecular. Hasta la fecha, los dispositivos basados en moléculas orgánicas se han enlazado con líneas metálicas habituales, creadas por medios litográficos. No será sencillo reemplazarlas por nanofilamentos, porque ignoramos cómo establecer una buena conexión eléctrica sin echar a perder en el proceso estos diminutos filamentos. Tal vez se resuelva el problema mediante nanofilamentos y nanotubos para los dispositivos y para las interconexiones.

En segundo lugar, una vez ligados a nanofilamentos los componentes, será preciso organizar los propios hilos, disponiéndolos según una matriz bidimensional. En un informe publicado meses atrás, Duan y otro miembro de mi equipo, Yu Huang, dieron a conocer un importante avance: el ensamblaje de nanocircuitos por medio de flujos fluidos. Al igual que los troncos y los palos flotan río abajo, los filamentos nanoescalares pueden alinearse paralelos mediante fluidos. En mi laboratorio hemos utilizado etanol y otras disoluciones y hemos controlado el flujo líquido haciéndolo pasar por canales moldeados en bloques de polímero, fáciles de situar sobre el sustrato donde deseamos ensamblar dispositivos.

El proceso descrito crea interconexiones en la dirección del flujo fluido; si el flujo corre a lo largo de un solo canal, se forman nanofilamentos paralelos. Para añadir filamentos en otras direcciones, se reorienta el flujo y se repite el proceso, construyendo capas adicionales de nanofilamentos. Por ejemplo, para producir un enrejado rectangular, se tiende primero una serie de nanofilamentos paralelos; se hace girar 90 grados la dirección del flujo y se tiende una segunda serie. Con hilos de diferentes composiciones en distintos estratos, podemos ensamblar rápidamente una matriz de nanodispositivos funcionales utilizando un equipo no muy superior al de un laboratorio de química de un centro de enseñanza media debidamente dotado. Una matriz de diodos, por ejemplo, está formada por una capa de nanotubos conductores yacente sobre otra de nanotubos semiconductores, o por una capa de nanofilamentos de tipo *n* tendida sobre otro estrato de nanofilamentos de tipo *p*. En ambos casos, cada punto de contacto actúa como un diodo.

Nuestra metodología, que es parecida a la seguida por el equipo de UCLA y Hewlett-Packard, es determinística. Nos proponemos crear matrices que posean un comportamiento predictible. La forma sigue a la función. Otra posibilidad, planteada por el grupo de Rice, Yale y la Universidad estatal de Pennsylvania, consiste en dejar que se interconecten al azar bloques de dispositivos y tubos. Posteriormente, el conjunto puede ser analizado para determinar de qué modo podría aplicarse para almacenamiento o para computación. En este caso, la función sigue a la forma. Este procedimiento presenta la dificultad de que haría falta un enorme esfuerzo para trazar el mapa de una red compleja y averiguar después su empleo potencial.

Intimamente relacionado con todos los esfuerzos anteriores se encuentra el desarrollo de arquitecturas que saquen el máximo partido de las características excepcionales de los nanodispositivos y de la capacidad de ensamblaje "desde abajo". Aunque podemos construir una infinidad de nanoestructuras de precio irrisorio, estos dispositivos son mucho menos fiables que sus homólogos microelectrónicos. Además, nuestra capacidad de ensamblaje y organización es, todavía, bastante rudimentaria.

Mi grupo, en colaboración con André DeHon, del Instituto de Tecnología de California, ha estado trabajando en arquitecturas altamente simplificadas, susceptibles de generalización a máquinas computadoras universales. En lo tocante a memorias, la arquitectura comienza con una formación bidimensional de nanofilamentos entrecruzados, o de interruptores electromecánicos en suspensión, que permiten almacenar información en cada punto de cruce. La misma arquitectura básica la están estudiando investigadores de UCLA y de Hewlett-Packard; nos recuerda la memoria de núcleos magnéticos que solían utilizar los ordenadores de los años cincuenta y sesenta del siglo pasado.

La ley de los grandes números

Para superar la deficiente fiabilidad de los nanodispositivos individuales, cabe confiar en el puro número. (Estos artefactos son tan baratos, que siem-

MATRICES FILARES



LOS NANOFILAMENTOS entrecruzados resuelven con suma nitidez uno de los grandes problemas de la electrónica de escala molecular: ¿cómo conectar conductores a transistores o diodos? Los filamentos prestan un doble servicio, pues operan como conductores y como componentes. Cada unión es un componente; en este caso, un relé miniaturizado, es decir, un interruptor electromecánico que se encuentra ora cerrado (*los contactos se tocan*), ora abierto (*contactos separados*). Para cambiar el estado de un interruptor se aplica cierta diferencia de potencial a los nanofilamentos. El interruptor permanecerá entonces indefinidamente en la nueva posición. Se han utilizado también filamentos semiconductores entrecruzados para crear interruptores que se cierran o abren eléctricamente, sin desplazamientos mecánicos. Se pueden obtener así matrices lógicas o de memoria, elementos fundamentales para una nanomáquina computadora.

pre hay repuestos en abundancia.) Las investigaciones sobre tolerancia a los defectos han puesto de manifiesto que la computación es posible incluso cuando fallen muchos de los componentes, si bien puede resultar lenta y laboriosa la identificación y localización de los defectos. En última instancia, confiamos en repartir las enormes matrices en submatrices cuya fiabilidad pueda supervisarse sin dificultad. El tamaño óptimo de estas submatrices dependerá de los niveles típicos de defectos que ofrezcan los dispositivos moleculares o nanoescalares.

Otro importante obstáculo que ha de superar la nanoelectrónica es el del “autolanzamiento”. ¿Cómo logran los ingenieros que los circuitos realicen lo que ellos desean? En microelectrónica, los diseñadores de circuitos trabajan según pautas tomadas de los arquitectos: levantan los planos de un circuito, cuya fabricación se deja al taller. En nanoelectrónica, los diseñadores tendrán que operar como los programadores informáticos. Una planta de fabricación producirá un nanocircuito “en bruto”: miles y miles de millones de dispositivos y filamentos cuyo funcionamiento es bastante limitado. Desde el exterior, tendrá el aspecto de un montón de material del que sobresale un puñado de filamentos. Los ingenieros, valiéndose de estos pocos hilos, tendrán que arreglárselas para configurar aquellos miles de millones de dispositivos.

Puede que los nanodispositivos tengan aplicaciones útiles incluso antes de que sean resueltos estos problemas. Por ejemplo, los nanotubos semiconductores de carbono han sido utilizados por el grupo de Hongjie Dai, en la Universidad de Stanford, para la detección de moléculas de gas, y Yi Cui, de mi grupo, se ha valido de filamentos semiconductores ultrasensibles para la detección de una amplia gama de compuestos biológicos.

En el marco de nuestra investigación en la Universidad Harvard hemos convertido en sensores a transistores nanofilares de efecto de campo, modificando sus superficies con receptores moleculares. Esta técnica ofrece la posibilidad de detectar moléculas individuales con un voltímetro común, de los que se venden en ferreterías. El diminuto tamaño y la sensibilidad de los nanofilamentos también hacen posible el ensamblaje de sensores extremadamente potentes, capaces, quizá, de secuenciar el genoma humano entero en un solo chip o de prestar servicio en dispositivos médicos muy poco invasivos. Es posible que, a corto plazo, veamos híbridos de lo micro y lo nano: silicio más un nanonúcleo, tal vez una memoria de ordenador de alta densidad que conserve su contenido indefinidamente.

Antes de que la nanoelectrónica se abra paso hasta los ordenadores hará falta no poco trabajo, pero esta meta parece hoy menos nebulosa que hace sólo un año. Conforme vayamos adquiriendo confianza aprenderemos no sólo a miniaturizar la microelectrónica digital, sino también a ir hasta donde ningún circuito digital ha llegado antes. Los dispositivos nanoescalares que muestran efectos cuánticos podrían aplicarse a la encriptación y la computación cuántica. La riqueza del nanomundo va a cambiar el macromundo.



Nanotécnica en medicina

Una vez alcance mayor desarrollo, la nanotécnica acabará por introducirse en la investigación biomédica, el diagnóstico de enfermedades y la terapéutica

A. Paul Alivisatos

Desde mediados de los años sesenta, el mundo del cine ha ofrecido visiones futuristas de la nanotécnica aplicada a la medicina, con cirujanos liliputienses embarcados en minúsculos submarinos que viajan por el torrente sanguíneo para extirpar coágulos cerebrales. En los últimos 35 años se han dado grandes pasos hacia la construcción de dispositivos complejos de dimensiones cada vez menores, hasta tal punto que algunos creen que son posibles intervenciones médicas de ese tipo y que pronto estarán navegando robots minúsculos por las venas. La idea ha prendido. A algunos incluso les preocupa la cara oscura de técnicas similares: ¿no podrían desbocarse los autómatas nanométricos que se autorreprodujesen y destruir el mundo vivo?

Fantasías aparte, la nanotécnica podría proporcionar nuevos instrumentos a la investigación biomédica; por ejemplo, ofrecer tipos nuevos de etiquetas útiles para los experimentos en torno a nuevos fármacos o para conocer qué conjuntos de genes operan en determinadas circunstancias. Los dispositivos nanométricos podrían intervenir en las pruebas diagnósticas y genéticas, amén de convertirse en óptimos medios de contraste en las técnicas no agresivas de formación de imágenes o en vectores de administración de fármacos.

1. AMPOLLAS MUY AMPLIADAS que contienen soluciones de puntos cuánticos —nanocristales semiconductores— de tamaños prefijados. El tamaño preciso de un punto cuántico determina el color que emite tras su exposición a la luz. Ligando diferentes tamaños de los puntos a diferentes moléculas biológicas, podemos seguir simultáneamente las actividades de muchas moléculas etiquetadas.

La propia biología constituye una suerte de virtuosismo nanotécnico. Hasta el organismo más complejo está compuesto por células muy pequeñas, integrado a su vez por piezas nanométricas: proteínas, lípidos, ácidos nucleicos y otras moléculas. Por convenio, se restringe el significado de “nanotécnica” a los artefactos de semiconductores, metales, plásticos o vidrio. Ya se venden como agentes de contraste ciertas estructuras inorgánicas nanométricas. Se trata de unos cristales minúsculos.

Atracción magnética

La naturaleza viva ofrece un hermoso ejemplo de la utilidad de esos cristales inorgánicos. Me refiero a las bacterias magnetotácticas (sensibles al magnetismo). Estos microorganismos, que viven en masas de agua y en sus enfangados fondos, medran sólo a determinada profundidad del agua o de los sedimentos. Por encima de esa zona, hay demasiado oxígeno; por debajo, demasiado poco. La bacteria que sea empujada fuera de su zona de seguridad se esforzará por volver. Para ello cuenta con un flagelo de propulsión. Pero, ¿cómo distingue arriba y abajo una bacteria flotante, si no podemos decir que la gravedad llegue a afectarle?

Porque posee una cadena de unos veinte cristales magnéticos. Mide cada unidad de 35 a 120 nanómetros de diámetro. El conjunto de los cristalitos forma una brújula en miniatura. Puesto que en la mayoría de los sitios el campo magnético terrestre

El autor

A. PAUL ALIVISATOS, profesor del departamento de química de la Universidad de California en Berkeley, donde se doctoró en 1986, es miembro de la Sociedad Americana para el Avance de la Ciencia y de la Sociedad Americana de Física. Ha recibido numerosos galardones por sus investigaciones sobre las propiedades físicas de los nanocristales.

está inclinado (no sólo apunta hacia el norte, sino hacia abajo en el hemisferio norte y hacia arriba en el sur), la bacteria magnetotáctica podrá seguir una línea de campo magnético hacia arriba o hacia abajo en su movimiento hacia el destino deseado.

Esa brújula es una maravilla de ingeniería nanométrica. De entrada, está hecha del material perfecto: magnetita o greigita, minerales de hierro ambos muy magnéticos. Tampoco es un accidente que conste de varios cristales. A escalas muy pequeñas, cuanto mayor es una partícula magnética más tiempo permanece imantada. Pero si la partícula excede cierto tamaño, originará espontáneamente dos dominios magnéticos, con imantaciones dirigidas en sentidos opuestos. Un cristal así tiene una magnetización total pequeña y no es una aguja de brújula muy eficiente. La bacteria, al hacer sus brújulas con cristales que alcanzan justo el tamaño apropiado para existir como un solo dominio magnético estable, saca el mayor partido de cada fracción de hierro que utiliza. El hombre sigue esa misma estrategia cuando prepara medios de almacenaje en disco duro y emplea nanocristales de un tamaño que les haga ser a la vez estables y fuertes.

La investigación biomédica podría servirse pronto de cristales magnéticos artificiales de dimensiones similares. Dos grupos, uno en Alemania y el otro en la Universidad de California en Berkeley, están explorando la posibilidad de recurrir a nanopartículas magnéticas para detectar microorganismos patógenos.

Su método requiere anticuerpos adecuados que se traben a dianas específicas. Las partículas magnéticas se fijan, a modo de etiquetas, a los anticuerpos seleccionados, que se administran entonces a la muestra en estudio. Para comprobar si esos anticuerpos sonda se han unido a las dianas, se aplica un campo magnético intenso (que imanta transitoriamente las partículas) y se examina el espécimen con un instrumento sensible, capaz de detectar los campos magnéticos débiles que emanan entonces de tales sondas. Los anticuerpos etiquetados que no se han trabado van dando tumbos por la solución sin emitir ninguna señal magnética. Pero los anticuerpos trabados no pueden girar, y la suma de sus etiquetas magnéticas genera un campo magnético que se detecta con facilidad.

Como las sondas sin trabar no producen señal, este procedimiento prescinde de los sucesivos lavados acostumbrados en tales ensayos, en los que se invierte mucho tiempo. La sensibilidad lograda con esta técnica experimental supera ya la de los métodos ordinarios; con las mejoras del dispositivo que se esperan, deberá ser cientos de veces mayor.

Pese a las ventajas, no es probable que el método magnético obligue a abandonar al procedimiento habitual de marcar las sondas con una etiqueta fluorescente: una molécula orgánica que resplandece con un tono característico cuando la excita luz de un determinado color. Los colores son muy útiles en varios procedimientos diagnósticos y de investigación; por ejemplo, cuando se exige el rastreo de más de una sonda.

El mundo de la electrónica moderna está lleno también de materiales fotoemisores. Las lectoras de CD operan con un diodo láser de estado sólido hecho con un semiconductor orgánico. Extraigamos un fragmento de ese material, del tamaño de una proteína. La fracción será un nanocristal semiconductor, "un punto cuántico". También estos puntos tienen mucho que ofrecer a la biomedicina.

Como sugiere su nombre, los puntos cuánticos deben sus especiales propiedades a las reglas de la mecánica cuántica, las mismas que exigen que los electrones ocupen en los átomos ciertos niveles de energía. Una molécula de un colorante orgánico absorbe sólo fotones, partículas de luz, de la energía necesaria para que sus electrones salten del estado de reposo a otro superior permitido. Es decir, la luz incidente debe tener exactamente la longitud de onda, o color, que se precisa para ese salto. La molécula emitirá después un fotón al caer el electrón a un nivel de energía más bajo. Se trata de un fenómeno muy alejado del observado en semiconductores voluminosos, donde los electrones pueden ocupar dos bandas anchas de energía. Esos materiales pueden absorber fotones de una amplia gama de colores (todos los que tengan energía suficiente para salvar la separación entre las dos bandas), pero emiten luz sólo de una longitud de onda determinada, la correspondiente a la energía del intervalo de banda. Los puntos cuánticos definen un caso intermedio. Igual que los semiconduc-

Resumen/Nanomedicina

- En la investigación biomédica, en el diagnóstico y en la terapia podemos emplear estructuras nanométricas construidas con materiales inorgánicos.
- Los ensayos biológicos que miden la presencia o actividad de sustancias seleccionadas ganan en rapidez, sensibilidad y flexibilidad cuando se utilizan, por marcadores, partículas nanométricas.
- Las nanopartículas podrían liberar el fármaco en el sitio indicado. Se evitarían así los efectos secundarios perjudiciales de los remedios drásticos.
- Se confía en ver el día en que se apliquen elementos artificiales nanométricos para reparar hueso, cartílago o piel; podrían incluso contribuir a la regeneración de los órganos de los pacientes.

UN PLAN PARA LA MEDICINA

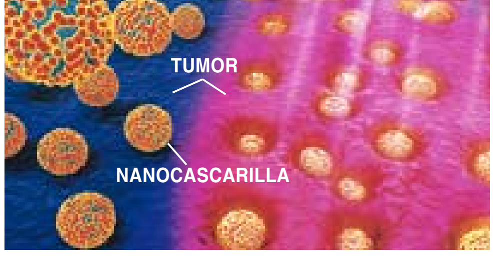
La Iniciativa Nanotécnica Nacional incluye entre sus objetivos, o “grandes retos”, una serie de mejoras previsibles de la detección, diagnóstico y tratamiento de las enfermedades. Recogemos algunas. Entre los objetivos, se proponen nuevas ayudas para la visión y el oído, pruebas rápidas para la detección de la propensión a enfermedades y de la reacción a fármacos, y dispositivos minúsculos capaces de descubrir riesgos en el cuerpo, como tumores incipientes, infecciones o problemas cardiacos, y transmitir la información a un receptor externo, cuando no arreglarlos sobre la marcha.

1 OBJETIVO: Mejorar los métodos de formación de imágenes

Medios de contraste de nuevo cuño detectarían los problemas en fases más tempranas y tratables. Podrían, por ejemplo, descubrir tumores (*rojo*) en su estadio precoz de pocas células.



2 OBJETIVO: Nuevas formas de tratar las enfermedades



Las nanopartículas administrarían los tratamientos en sitios indicados, incluidos los que resultan de difícil acceso para los fármacos conocidos. Así, unas nanocascarillas de oro (*esferas*) dirigidas contra un tumor podrían, sometidas a luz infrarroja, calentarse lo bastante como para destruir las neoformaciones.

3 OBJETIVO: Implantes superiores



Las modificaciones nanométricas de los implantes superficiales mejorarían la duración del implante y su biocompatibilidad; como botón de muestra, una cadera artificial recubierta con nanopartículas podría conectarse al hueso circundante más firmemente de lo normal, con lo que se evitaría su desprendimiento.

tores voluminosos, absorben fotones de cualquier energía mayor que la umbral del intervalo de banda. Pero la longitud de onda de la luz que emiten —su color— depende mucho del tamaño del punto. Por consiguiente, un solo tipo de material semiconductor produce un repertorio cromático entero de etiquetas.

La física de los puntos cuánticos nació en los años setenta del siglo XX. Creíase entonces que llegaría el día en que pudieran crearse con ellos nuevos dispositivos electrónicos u ópticos. No se pensaba en una aplicación diagnóstica ni de síntesis de nuevos fármacos. La construcción de puntos cuánticos que funcionasen adecuadamente en sistemas biológicos, hoy una realidad, tardó años en llegar.

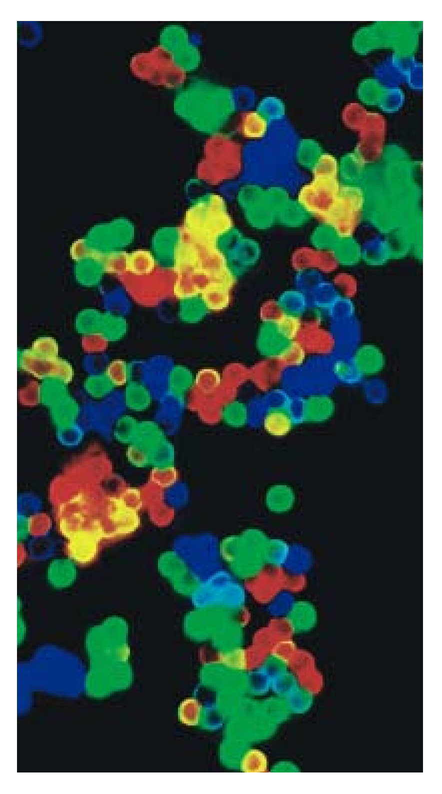
Nanotécnica de los puntos cuánticos

La compañía a la cabeza del empeño por comercializar esta técnica, la Quantum Dot Corporation, posee los derechos de las técnicas desarrolladas en mi laboratorio de la Universidad de California en Berkeley y en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, la Universidad de Indiana, el Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley y la Universidad de Melbourne. Vaya por delante reconocer que intervine en la fundación de la empresa. Admito, pues, que mis ponderaciones de esa nanotécnica puedan estar sesgadas.

Los nanocristales semiconductores presentan varias ventajas sobre los marcadores moleculares cro-

máticos al uso. Los cristales inorgánicos pueden soportar un número de ciclos de excitación y fotoemisión bastante mayor que las moléculas orgánicas corrientes, que se degradan enseguida. Gracias a esa estabilidad podemos seguir lo que va sucediendo en las células y tejidos durante intervalos largos. Pero el mayor beneficio de los nanocristales semiconductores es menos sutil. Existen en más colores.

Los sistemas biológicos, muy complejos, nos obligan con frecuencia a observar varios componentes a la vez. Cuesta lograr ese seguimiento porque los distintos colorantes orgánicos se excitan con longitudes de onda diferentes. Pero los puntos cuánticos admiten que se marquen múltiples moléculas biológicas, cada una con un cristal de un tamaño (y por lo tanto de un color) diferente. Puesto que todos esos cristales se activan con una sola fuente de luz, los podemos rastrear al unísono.



2. PERLAS DE LATEX rellenas de puntos cuánticos de un solo color brillan a casi las mismas longitudes de ondas que los puntos. Se han cargado también selecciones de colores diferentes en cada cuenta. Se pretende crear una amplísima variedad de etiquetas distintas para pruebas biológicas.

Se está trabajando con ahínco en este método. No terminan ahí, sin embargo, las posibilidades que ofrecen los puntos cuánticos. Sea una perla de látex rellena con una combinación de puntos cuánticos. La cuenta podría contener puntos de cinco tamaños, vale decir, de cinco colores diferentes, con diversas concentraciones de cada uno. Una vez iluminada, la cuenta emitirá luz, que, dispersada por un prisma, producirá cinco líneas espectrales nítidas, con las intensidades que se hayan prescrito: una suerte de código de barras espectral. Con perlas así se dispone de un número enorme de etiquetas (en potencia, miles de millones), cada una de las cuales podría pegarse a moléculas de ADN compuestas de secuencias diferentes de elementos genéticos.

Estas cuentas permiten cotejar fácilmente el material genético de una muestra con una biblioteca de secuencias de ADN conocidas (podría proceder así el investigador que quisiese saber qué genes están activos en ciertas células o tejidos). Para ello bastaría con exponer la muestra a toda la biblioteca de cuentas y leer los códigos de barras espectrales de los ADN de la biblioteca que se acoplasen con las secuencias de la muestra. Como las secuencias genéticas sólo se acoplan cuando coinciden (cuando una secuencia es complementaria de la otra), los resultados revelarían de inmediato la naturaleza del material genético de la muestra.

Los puntos cuánticos semiconductores no son las únicas nanoestructuras que nos facultan para manifestar ópticamente la composición genética de un espécimen biológico. Los trabajos de Chad A. Mirkin y Robert L. Letsinger, de la Universidad del Noroeste, ofrecen otro ejemplo de esa capacidad. Su ingenioso método permite comprobar la presencia de una secuencia genética en una solución por medio de partículas de oro, de 13 nanómetros, ornadas de ADN.

Trabajan con dos grupos de partículas de oro. El primero porta un ADN que se acopla a una mitad de la secuencia diana; el segundo grupo, ADN que se acopla a la otra mitad. El ADN con la secuencia diana entera se engarza enseguida a ambos tipos de partículas y conecta a éstas entre sí. Como cada partícula tiene múltiples tentáculos de ADN, los segmentos de material genético que lleven la secuencia diana aglutinarán muchas partículas. Y cuando esas partículas de oro se agregan, sus propiedades ópticas cambian notablemente; la solución de prueba pasa de roja a azul. Como es fácil ver el resultado de la prueba sin instrumental alguno, un sistema así resultaría óptimo para hacer pruebas domésticas de ADN.

Percibir la fuerza

Ninguna exposición de la nanotécnica aplicada a la biología estaría completa si olvidáramos la instrumentación. En particular, el microscopio de fuerza atómica, aparato que sondea los materiales a la manera en que el viejo fonógrafo leía los surcos del disco: arrastrando una punta afilada sobre la superficie y detectando las desviaciones que vaya habiendo. Pero la punta de un microscopio de fuerza atómica es mucho más fina que la aguja del fonógrafo; puede, pues, captar estructuras mucho menores. No fue tarea fácil fabricar puntas finas y poderosas.

La solución apareció en 1996. Investigadores de la Universidad de Rice fijaron un angosto nanotubo de carbono a la punta de un microscopio de fuerza atómica, y de esa forma éste pudo sondear muestras de sólo unos nanómetros de tamaño. En 1998 Charles M. Lieber y su grupo, de la Universidad de Harvard, aplicaron la idea al sondeo de biomoléculas y proporcionaron un medio de muy alta resolución para la exploración de moléculas biológicas complejas y sus interacciones al nivel más básico.

Quizás el microscopio de fuerza atómica no se limite pronto a hacer mediciones científicas fundamentales. El año pasado James K. Gimzewski, del laboratorio de investigación de IBM en Zurich, mostró, con sus colaboradores de

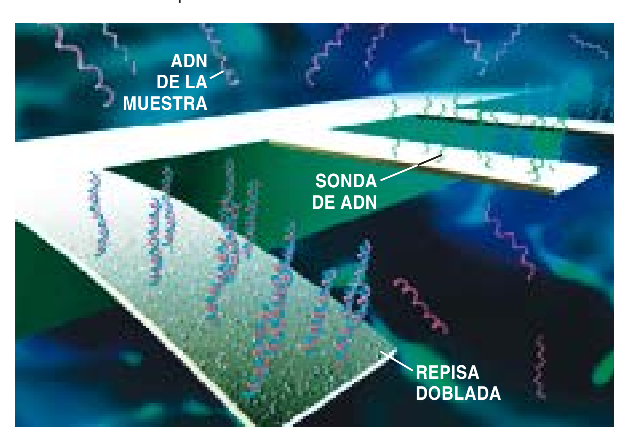
NANOTECNICA APLICADA A LA BIOLOGIA

Es posible que los productos que se exponen aquí aumenten algún día la velocidad y potencia de las pruebas biomédicas, por ejemplo las que examinan pequeñas muestras de material en busca de secuencias genéticas determinadas. Por mor de claridad, las imágenes no se han dibujado a escala



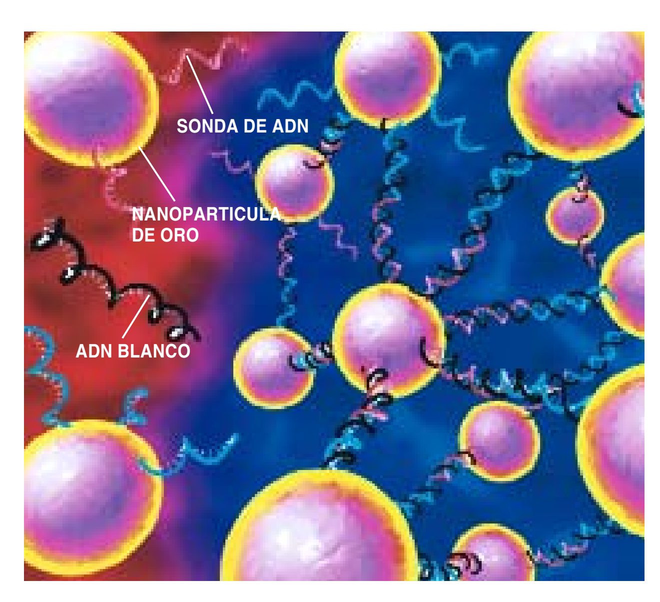
ETIQUETAS MAGNETICAS

Muchas pruebas descubren la presencia de una molécula o de un organismo patógeno al detectar que un anticuerpo se ha trabado con dicha diana. Cuando los anticuerpos etiquetados con nanopartículas magnéticas se asocian a su blanco, situado en una superficie (*primer plano*), una breve exposición a un campo magnético hace que las sondas emitan globalmente una poderosa señal magnética. Mientras, los anticuerpos sin ligar van dando tumbos en todas direcciones y no producen una señal neta. Esta última propiedad posibilita la lectura de los resultados sin tener que eliminar antes las sondas que no den con su blanco.



REPISAS INTELIGENTES

Es posible examinar las muestras biológicas en busca de ciertas secuencias génicas por medio de pequeños salientes (repisas), como los que se emplean en los microscopios de fuerza atómica. La superficie de cada repisa está revestida con un ADN que se acopla a una secuencia blanco determinada. Se expone entonces una muestra a las repisas. El acoplamiento induce una tensión superficial que dobla las repisas afectadas unos nanómetros, no mucho, aunque suficiente para revelar que los salientes doblados encontraron sus dianas específicas en la muestra.



PARTICULAS DE ORO

Las nanopartículas de oro ornadas con cortos segmentos de ADN podrían formar la base de una prueba de la presencia de una secuencia génica (*negro*) en una muestra. El ADN complementario a una mitad de esa secuencia (*rojo*) queda unido a un grupo de partículas en solución; el ADN complementario de la otra mitad (*azul*) a un segundo grupo de partículas. Si la secuencia que interesa está en la muestra, se ligará a los tentáculos de ADN de ambos conjuntos de esferas y éstas quedarán atrapadas en una densa red. Semejante aglomeración hará que la solución cambie de color (*de rojo a azul*).



CODIGOS DE BARRAS NANOMETRICOS

Unas perlas de látex con los colores de unos semiconductores nanométricos, los puntos cuánticos, podrían en principio etiquetar un número cualquiera de sondas dando a cada una su marca propia. En respuesta a la luz, las cuentas se identificarían (y, por tanto, las sondas que se ligasen con ellas) emitiendo una luz que se descompondría en un espectro característico de colores e intensidades, una suerte de código de barras espectral.

IBM y de la Universidad de Basilea, que con una serie de brazos micrométricos, o repisas, muy parecidos a los que se utilizan en los microscopios de fuerza atómica, se podían examinar las muestras y buscar en ellas ciertas secuencias genéticas. Adhirieron hebras cortas de ADN a las partes de arriba de las repisas. Cuando un material genético que incluye una secuencia complementaria se acopla a las hebras sujetas a las repisas, genera una tensión superficial que dobla a éstas ligerísimamente —sólo unos nanómetros—, lo suficiente para que se detecte. Debería bastar con fabricar un dispositivo con muchas repisas y cubrir cada una con tipos diferentes de ADN para comprobar rápidamente si una muestra biológica posee determinadas secuencias genéticas (como se hace ahora rutinariamente por medio de los chips génicos) con medios nanométricos y sin tener que etiquetar.

Nos revela ese ejemplo que las conexiones entre la nanotécnica y la práctica de la medicina son a menudo indirectas: buena parte de los nuevos trabajos sólo prometen mejores instrumentos para la investigación o ayudas para el diagnóstico. Pero en algunos casos los nanoobjetos que se están desarrollando podrían cumplir misiones terapéuticas. Piénsese en fármacos encapsulados en envases nanométricos que controlasen la administración precisa del medicamento.

Me detendré en los dendrímeros orgánicos. Hace veinte años Donald A. Tomalia, del Instituto Molecular de Michigan en Midland, construía los primeros prototipos. La molécula de dendrímero se va ramificando sucesivamente de adentro afuera. De estructura globular, alcanzan el tamaño de las proteínas. Divergen de éstas, sin embargo, en que no se degradan ni despliegan con facilidad; se lo impiden unos enlaces químicos más fuertes.

Los dendrímeros, caracterizados por su enorme área superficial interna, pueden configurarse de manera que presenten cavidades con tamaños diferentes; esos espacios son ideales para albergar agentes terapéuticos. Podrían transportar ADN hasta el interior de las células para una terapia génica. Operación que realizarían sin el peligro potencial de otro vector importante, los virus modificados genéticamente.

Aunque no son las únicas estructuras portadoras de fármacos merced a su extensa superficie, los dendrímeros ofrecen un mayor grado de control y flexibilidad. Quizá se llegue a la creación de modelos que espontáneamente se hinchen y liberen la medicina en presencia de moléculas estimuladoras del proceso. Un tal dendrímero, cortado a la medida, soltaría su carga medicinal en los tejidos u órganos indicados.

No podemos olvidar, entre los vectores, las cápsulas poliméricas huecas que estudia Helmut Möhwald, del Instituto Max Planck de Coloides e Interfases de Golm. En respuesta ante ciertas señales, las cápsulas se hinchan o comprimen y liberan la carga.

Mención aparte merecen unas perlitas de vidrio recubiertas de oro, las nanocascarillas, inventadas en la Universidad de Rice. Aunque podrían fabricarse de manera que absorban luz de casi cualquier longitud de onda, las nanocascarillas que captan energía del infrarrojo cercano son las más interesantes, pues esas longitudes de ondas atraviesan fácilmente varios centímetros de tejido. Con una fuente intensa de infrarrojos podemos calentar desde el exterior nanocascarillas inyectadas en el cuerpo; en consecuencia, podría intentarse que una nanocascarilla administrase las moléculas del fármaco en instantes determinados uniéndola a una cápsula hecha de un polímero sensible al calor. La cápsula soltaría su contenido cuando la deformase el calentamiento suave de la nanocascarilla que llevase adherida.

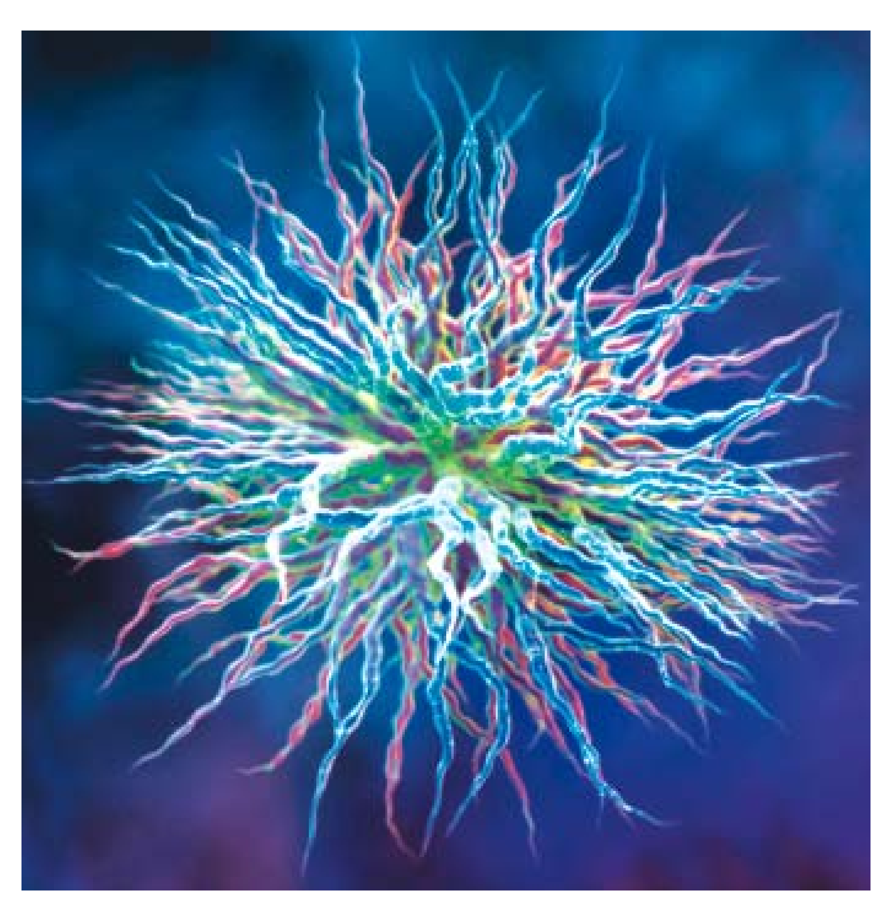
Se ha pensado aplicar también las nanocascarillas a la oncoterapia, mediante la unión de las esferas doradas a anticuerpos que se traben específicamente con células tumorales. En teoría, bastaría con calentar las nanocascarillas para

Microfluidos e investigación biomédica

La mayoría de las nanotécnicas que están desarrollándose con fines biomédicos toman la forma de objetos diminutos inmersos en cantidades grandes de fluido, sea agua, sangre o un complejo brebaje experimental. Pero los investigadores pueden construir también dispositivos que manejan cantidades minúsculas de esos líquidos. Tales sistemas microfluidos, así se los llama, bombean soluciones a través de canales estrechos y controlan el flujo con válvulas pequeñísimas y campos eléctricos intensos.

Gracias a esta capacidad de manejar cantidades infinitesimales de solución se pueden hacer muchos experimentos diferentes con una muestra escasa; además pueden realizarse de un modo muy eficaz, con cientos de pruebas desarrolladas en un solo portador de vidrio. Los dispositivos microfluidos ofrecen los medios para efectuar experimentos que no podrían acometerse de otra forma; por ejemplo, aplicar soluciones de prueba con composiciones específicas a partes diferentes de una célula.

Aunque muchos de los componentes que se están creando para estos sistemas superan de lejos la micra, en algunos dispositivos experimentales hay dimensiones nanométricas. Destacan los métodos que el equipo de Harold G. Craighead, de la Universidad de Cornell, ha ideado para clasificar fragmentos de ADN en agua por su tamaño según lo que tarden en atravesar cien nanómetros de ancho o en recorrer microcanales que van estrechándose repetidamente hasta que su hondura es de 75 a 100 nanómetros. Estos u otros dispositivos con nanofluidos podrían en principio aumentar la velocidad y reducir el coste de la separación de las moléculas de ADN para su secuenciación; en teoría, cabría adaptarlos a la separación de proteínas o de otras moléculas.



3. LOS DENDRIMEROS ORGANICOS, aquí en una representación artística, pueden tener más o menos el tamaño de una molécula de proteína. Los dendrímeros albergan muchas cavidades internas y en ellos se piensa para convertirlos en vectores de fármacos.

destruir las células cancerosas sin que sufriesen daños los tejidos circundantes.

Nadie sabe a ciencia cierta si las nanocascarillas acabarán por materializar todo cuanto prometen. Ni si lo harán la legión de nanoestructuras que se están desarrollando con fines médicos, entre ellas las buckybolas de un nanómetro creadas con unas cuantas docenas de átomos de carbono. Pese a todo, parece probable que alguno de esos dispositivos encontrará su sitio en la práctica médica de aquí a pocos años.

Hemos de contar, además, con la perspectiva de estructuras mayores, realizadas con elementos nanométricos, que imiten los procesos naturales de la vida. Esos materiales podrían servir para reparar tejidos deteriorados. Ya se han construido armazones donde crece hueso. Samuel I. Stupp, de la Universidad del Noroeste, pionero de este método, combina moléculas sintéticas para formar fibras a las que las células óseas tienen una fuerte tendencia a adherirse.

Entre los "grandes retos" de la Iniciativa Nanotécnica Nacional figura la detección precoz de tumores. Además, los investigadores confían en regenerar no sólo hueso, cartílago o piel, sino también órganos complejos por medio de armazones artificiales que guíen la actividad de las células.

Bibliografía complementaria

ULTRASENSITIVE MAGNETIC BIOSENSOR FOR HOMOGENEOUS INMUNOASSAY. Y. R. Chemla. H. L. Grossman, Y. Poon, R. McDermott, R. Stevens, M. D. Alper y J. Clarke en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 97, núm. 27, págs. 14.268-14.272, 19 de diciembre de 2000.

Nanotécnica y ensambladores

Uno de los iniciadores de la nanotécnica molecular predice que minúsculos robots revolucionarán la industria fabril y transformarán la sociedad

K. Eric Drexler

En 1959, en una célebre conferencia, Richard Feynman disertó sobre las fronteras de la miniaturización. A partir del estado en que se encontraba entonces la técnica (en una época en que una sumadora apenas cabía en el bolsillo de la gabardina), examinó los límites impuestos por las leyes físicas para concluir sosteniendo la posibilidad (incluso la inevitabilidad) de la construcción "átomo a átomo".

Lo que entonces parecía una ambición absurda, estrafalaria, se ha convertido ahora en una meta ampliamente compartida. Decenios de progreso técnico han reducido la microeléctrónica hasta los umbrales de la escala molecular, mientras que el progreso científico en el dominio molecular (sobre todo, en los mecanismos moleculares de los sistemas vivos) ya ha conseguido que muchos admitan lo que un genio imaginaba en solitario hace tanto tiempo.

Inspirados por la técnica molecular, los estudios sobre nanotécnicas avanzadas se han centrado en la construcción de abajo arriba, en la cual las máquinas moleculares ensamblan bloques, o componentes, básicos para formar productos, nuevas máquinas moleculares incluidas. La biología nos revela que los sistemas de máquinas moleculares y sus productos pueden fabricarse económicamente en cantidades industriales.

Yendo más allá de la analogía biológica, sería una pretensión natural colocar cada átomo en un lugar elegido (donde actuaría como parte de algún componente activo o estructural) sin moléculas sobrantes en libertad que atasquen los mecanismos. Un tal sistema no sería ni un líquido ni un gas, pues ninguna molécula se movería al azar, ni tampoco un sólido, en el que las moléculas ocupan sitios fijos. En vez de ello, esa nueva materia de fase máquina exhibiría el movimiento molecular que hoy sólo puede verse en líquidos y gases y también la resistencia mecánica característica de los sólidos. Su volumen estaría lleno de mecanismos activos.

La capacidad de construir objetos con exactitud molecular revolucionará la fabricación, permitiendo mejorar las propiedades de los materiales y las prestaciones de los mecanismos. Además, cuando un proceso de producción controla cada uno de los átomos, nada justifica los vertidos tóxicos al aire o a las aguas. Asimismo, las mejoras en la fabricación abaratarían las células solares y los sistemas de almacenamiento de energía, recortando las demandas de carbón y petróleo y reduciendo aún más la contaminación. Esos adelantos suscitan esperanzas de que los pueblos del mundo en desarrollo puedan alcanzar los niveles de vida del Primer Mundo sin causar un desastre ecológico.

Unos materiales baratos, livianos y muy robustos aumentarían mucho el rendimiento energético de los transportes y, en definitiva, la economía de los desplazamientos espaciales. Una vez más parecen viables los viejos sueños de expandir la biosfera más allá de nuestro vulnerable planeta.

Quizás el objetivo más excitante sea la reparación molecular del cuerpo humano. Se vislumbran robots médicos nanométricos que podrían destruir virus y células cancerosas, reparar estructuras dañadas, eliminar acumulaciones de residuos del cerebro y devolver el cuerpo a su estado de salud juvenil.

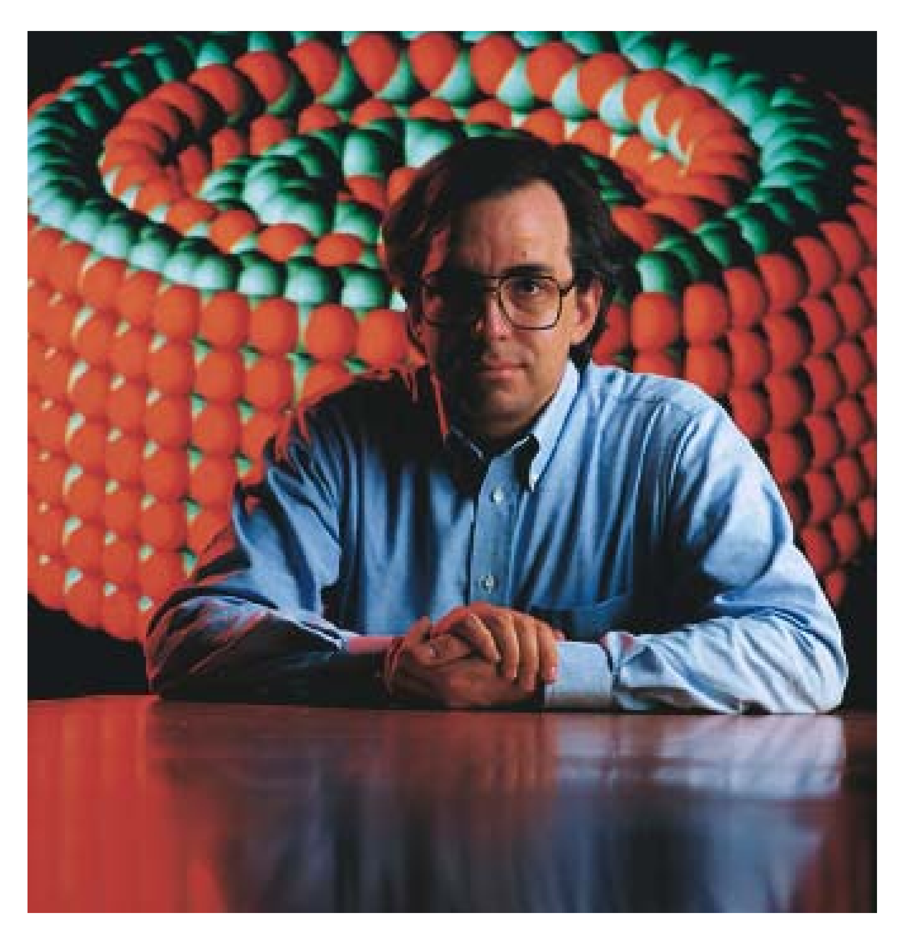
Otra sorprendente aplicación médica sería la eventual capacidad de reparar y revivir a esos pocos pioneros en estado de animación suspendida (considerados legalmente fallecidos), incluso los que fueron preservados mediante la tosca técnica de almacenamiento criogénico de los años sesenta. Las técnicas de vitrificación de hoy, que evitan la formación de los dañinos cristales de hielo, deberían hacer más fácil la reparación, pero el propio proceso original parece que preserva la estructura cerebral lo suficientemente bien para facilitar la restauración.

Se prevé que la base técnica de tales posibilidades estará quizá lista dentro de una a tres décadas. Por ahora, los trabajos se centran en las etapas iniciales: descubrir cómo construir estructuras mayores con exactitud atómica, aprender a diseñar máquinas moleculares e identificar los objetivos intermedios con buenos resultados.

Para entender el potencial de la técnica de fabricación molecular, conviene fijarse en los macrosistemas de máquinas empleados en

El autor

K. ERIC DREXLER es presidente del Instituto de Prospección, investigador del Instituto de Fabricación Molecular y autor de *Engines of Creation* y *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation.*



K. ERIC DREXLER concibió la idea de los sistemas mecánicos moleculares (en segundo plano se muestra un componente de uno de ellos).

la industria. Imagínese un brazo robótico que se coloca sobre una correa transportadora, recoge un útil cargado, aplica éste a una pieza en proceso, retorna el útil vacío a la correa, recoge el siguiente útil cargado, y así sucesivamente, tal como en las fábricas automatizadas modernas.

Ahora, mentalmente, hagamos que todo ese mecanismo encoja, correa transportadora incluida, hasta dimensiones moleculares para imaginarnos un sistema de construcción a escala nanométrica. Con una variedad suficiente de útiles, ese sistema sería un dispositivo de montaje de uso general, apodado ensamblador. En principio, sería capaz de construir cualquier cosa, hasta una copia de sí mismo.

Como campo, la nanotécnica molecular no depende de la factibilidad de ese propósito concreto; un conjunto de dispositivos de montaje menos general podría llevar a cabo las funciones antes mencionadas. Pero como la idea de ensamblador sigue siendo controvertida, vale la pena mencionar las objeciones que suscita.

Hablando en un encuentro reciente patrocinado por la Asociación Americana para el Progreso de la Ciencia, un destacado químico preguntaba cómo podría alimentarse de energía y gobernarse un ensamblador y si de veras podría romper y reconformar unos enlaces moleculares fuertes. A tan razonables preguntas puede responderse exponiendo diseños y cálculos ya realizados, aunque, por su volumen, no caben en este artículo.

Otro químico, también muy conocido, objeta que un ensamblador necesitaría diez "dedos" robóticos para ejecutar sus operaciones y que no hay espacio suficiente para todos ellos. Pero la necesidad de un número tan elevado de dedos nunca se ha comprobado y ni siquiera razonado en serio. Por contraste, los diseños que han sufrido (y resistido) los escrutinios más severos usan un útil cada vez y los asen sin emplear dedo alguno.

Es importante que las críticas a la nanotécnica se hagan con acierto, pues de ellas dependen decisiones vitales para la sociedad. Si la nanotécnica molecular, tal como se describe aquí, es correcta, las cuestiones de política pueden aparecer muy distintas de como generalmente se espera. La mayoría de la gente cree que el calentamiento global será difícil de corregir, pero con la nanotécnica el exceso de gases del efecto invernadero podría eliminarse de la atmósfera por poco dinero. Las proyecciones actuales de la Seguridad Social dan como hecho una población anciana creciente y de salud deficiente. Con una nanotécnica médica avanzada, los mayores del mañana podrían ser más activos y sanos que los de hoy, confiriendo un significado nuevo a los "años dorados".

Igualmente, tenemos ahora que centrarnos en la evitación de accidentes y en prevenir el abuso de esta poderosa técnica. Se ha realizado un trabajo bien fundamentado respecto a la prevención de accidentes importantes. Las Pautas de Previsión, disponibles en la Telaraña Mundial, esbozan las normas de seguridad propuestas.

Pero el reto de evitar el abuso (la explotación de esta técnica por gobiernos agresivos y grupos terroristas para sus propios fines) aún se alza muy amenazador. En estos días la analogía más afín a este problema es la dificultad para controlar la proliferación de armas químicas y biológicas. El progreso hacia la nanotécnica molecular resalta la urgencia de hallar métodos eficaces para manejar unas técnicas emergentes potentes, valiosas y expuestas al mal uso.

Bibliografía complementaria

ENGINES OF CREATION: THE COMING ERA OF NANOTECHNOLOGY. K. E. Drexler. Fourth Estate, 1990.

NANOSYSTEMS: MOLECULAR MACHINERY, MANUFACTURING, AND COMPUTATION. K. E. Drexler. John Wiley & Sons, 1992.

Nanotécnica y química

¿Cuándo veremos los robots de escala nanométrica? En química, nunca

Richard E. Smalley

Cuando un chico y una chica se enamoran suele decirse que entre ellos hay "buena química". El uso común de la palabra "química" en las relaciones humanas se acerca a las sutilezas de lo que realmente sucede en los más mundanos acoplamientos entre moléculas. En la reacción química entre dos moléculas, se forman enlaces entre algunos de los átomos, operación que acostumbra ser una complicada danza en la que intervienen movimientos en múltiples dimensiones. Pero no reaccionan dos moléculas cualesquiera. Deben ser las idóneas. Y si la química es muy, muy buena, las moléculas que sí reaccionen rendirán todas exactamente el producto deseado.

En el centro de toda reacción química, los átomos que van a formar los nuevos enlaces no son los únicos que se mueven en torno: así hacen también todos los átomos a los que aquéllos están unidos y los que a su vez están conectados a éstos. Todos esos átomos deben moverse de un modo exacto para asegurar que el resultado de la reacción es el pretendido. En una reacción química ordinaria, de cinco a 15 átomos contiguos al lugar de la reacción se traban en un intrincado vals que se ejecuta en una exigua región del espacio, no mayor que un nanómetro de lado.

De unos años acá se ha difundido la idea de unos diminutos robots (llamados ensambladores) capaces de manipular y construir cosas átomo a átomo. Imagínese un ensamblador solitario: trabajando con frenesí, al ocuparse de la tarea asignada, realizaría numerosos enlaces nuevos, colocando quizá hasta mil millones de átomos nuevos por segundo en la estructura deseada. Pero, pese a tal rapidez, resultaría irrelevante para manejar una nanofactoría: para generar siquiera una minúscula cantidad de producto un ingenio tal en solitario tardaría millones de años. (Hacer un mol de lo que sea, pongamos unos 30 gramos, requeriría al menos 6×10^{23} enlaces, uno por átomo. A la vertiginosa velocidad de 10^9 por segundo, nuestro robot nanométrico tardaría 6×10^{14} segundos, o sea, 10^{13} minutos, que hacen $6{,}9 \times 10^9$ días, o 19 millones de años.) Tal ensamblador no aportaría nada al mundo macroscópico "real".

Imaginemos, no obstante, que ese ingenio fuese tan versátil que construyera cualquier cosa, mientras dispusiera de átomos del tipo adecuado, una fuente de energía y un conjunto de instrucciones exactas. Esas instrucciones podrían elaborarse con un ordenador y luego enviarlas al robot. Si éste pudiera realmente construir cualquier cosa, podría construir otra copia de sí mismo. Por tanto, podría autorreplicarse. Tras un rato, tendríamos un segundo robot y, después de un poco más de tiempo, cuatro, luego ocho, después 16, y así sucesivamente.

Supongamos, por seguir con la fábula, que cada robot se compusiera de mil millones de átomos (10^9 átomos) en alguna estructura increíblemente complicada. Si esos dispositivos pudieran ser ensamblados a la velocidad total, antes imaginada, de mil millones de átomos por segundo, cada robot tardaría sólo un segundo en sacar una copia de sí mismo. Este clon podría entonces "ponerse en marcha" para iniciar su propia reproducción. Tras 60 segundos de tan frenética clonación, habría 2^{60} unidades, que es una increíble cifra de 1×10^{18}, o sea, un trillón. Ese ingente ejército de robots nanométricos produciría 30 gramos de producto en 0,6 milisegundos, es decir, 50 kilogramos por segundo. Eso ya es otra cosa.

Puede que, en general, tales robots no sean lo que se dice interesantísimos para construir cantidades prodigiosas de algo, pero los robots autorreplicantes encierran un interés innegable. De ser viables, la idea de una máquina capaz de construir cualquier cosa desde un reproductor de CD a un rascacielos en un tiempo notablemente corto no parece tan inverosímil.

El autor

RICHARD E. SMALLEY ocupa la cátedra Gene y Norman Hackerman de física y química en la Universidad de Rice. Por su descubrimiento de los fullerenos recibió el premio Nobel de química de 1996.

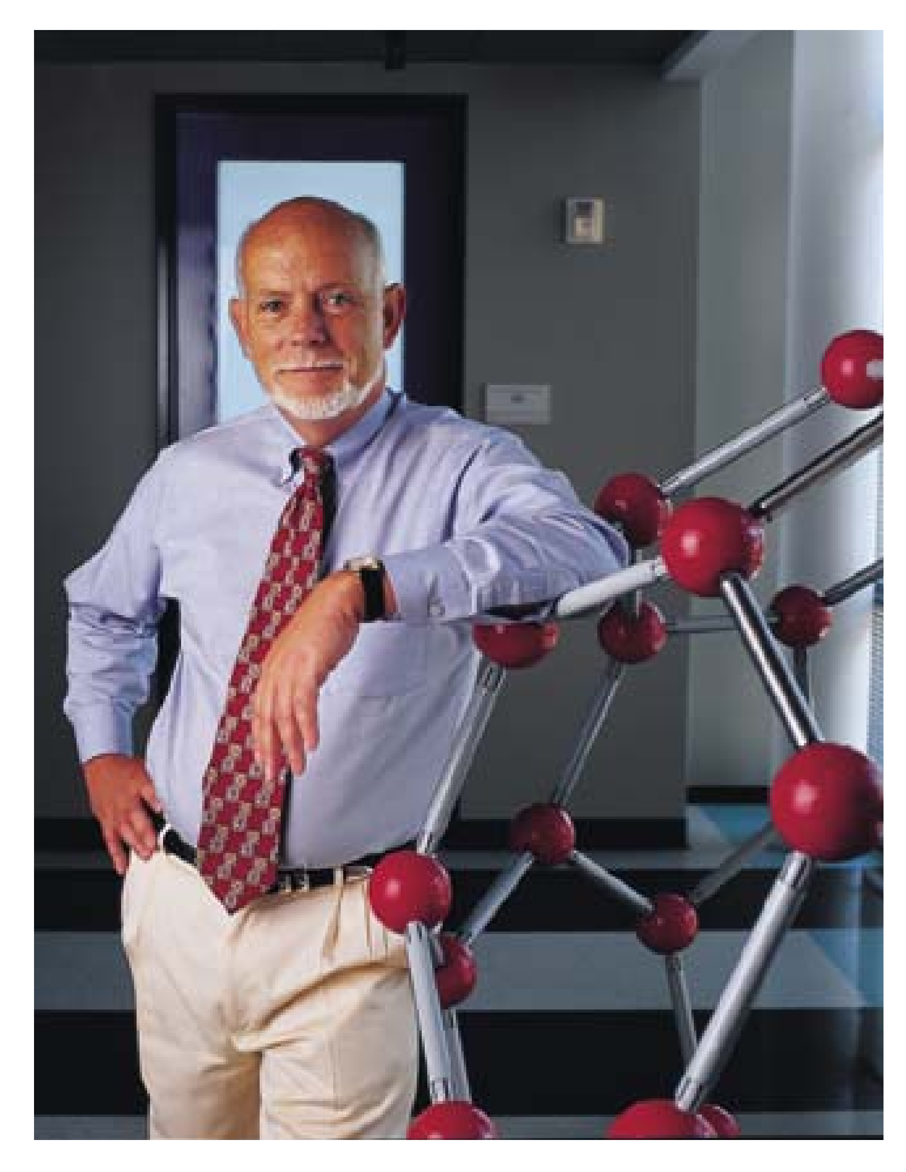
Pero, ¿quién controlará a esos autorreplicantes? ¿Cómo saber que esos diablillos no mutarán y que alguno de los mutantes no alcanzará la capacidad, como las células cancerosas, de desatender las señales que le ordenen autodestruirse? ¿Cómo detenerlos cuando hayan llegado a tan maligno estado? Los robots autorreplicantes serían el equivalente a una nueva forma de vida parasitaria, y no habría modo de impedir su expansión indefinida hasta que todo lo que hay en la Tierra se convirtiera en una gris y pegajosa masa amorfa.

Aún más pavoroso sería que, por su diseño o bien por una mutación aleatoria, desarrollaran la capacidad de comunicarse entre sí. Acaso se agruparían, constituyéndose en unos sistemas nerviosos primitivos. Quizá realmente pudieran convertirse en "entes vivos", como quiera que definamos tal expresión. Entonces, en las memorables palabras de Bill Joy, de Sun Microsystems, el futuro, lisa y llanamente, no nos necesitaría.

¿Qué base tiene la idea de robot nanométrico autorreplicante? Pensemos. Los átomos son minúsculos y se mueven de modo definido y circunscrito; con propiedad, se mueven de manera que minimizan la energía libre de sus entornos locales. El "pegamento" electrónico que los sujeta unos a otros no es local de cada enlace, sino sensible a la posición exacta e identidad de todos los átomos vecinos. Así, cuando el brazo del nanomanipulador de nuestro robot agarra un átomo y se va a insertarlo en el lugar deseado, se encuentra con un problema fundamental. No sólo tiene que controlar el nuevo átomo, sino todos los átomos de la región. No pasa nada, diremos: nuestro ingenio tendrá un brazo manipulador más por cada uno de esos átomos. Controlaría entonces todo lo que pasara en el escenario de la reacción.

Pero, recordemos, la región donde debe controlarse la química es mínima, del orden de un nanómetro de lado. Esa limitación implica al menos dos dificultades básicas. A una la llamo el problema de los dedos gordos y a la otra el problema de los dedos pegajosos. Como los dedos de un brazo manipulador deben estar hechos de átomos, tienen un cierto tamaño irreducible. No hay sitio bastante en la región, de tamaño nanométrico, donde se produce la reacción para acomodar a todos los dedos de todos los manipuladores necesarios para controlar la química. Cierto es que, como dijo Richard Feynman, "hay mucho sitio por abajo". Pero no *tanto* sitio.

Los dedos del manipulador del hipotético robot nanométrico autorreplicante, además de gruesos, son demasiado pegajosos: los átomos de las manos del manipulador se adherirían al átomo que estuvieran moviendo. Por ello, muchas veces sería imposible soltar ese minúsculo bloque básico en el lugar correcto.



EL PREMIO NOBEL Richard E. Smalley descarta la idea de robots nanométricos ingobernables.

Ambos problemas son fundamentales, y ninguno evitable. No hay posibilidad en nuestro mundo para los autorreplicantes. Para colocar cada átomo en su sitio harían falta dedos mágicos.

La química es ciertamente sutil. No se consigue que un chico y una chica se enamoren empujándolos uno hacia el otro. Como la danza del amor, la química es un vals con su propio paso-vuelta-paso al compás de tres por cuatro. No basta con querer para que un vals sea un merengue, ni para que podamos colocar cada átomo justo en el sitio correcto.

Máquinas nanométricas antiguas y futuras

La biología supera las fantasías más atrevidas con que se ha presentado el futuro de los robots moleculares

George M. Withesides

Entre los logros prometidos por la nanotécnica ocupan un puesto de honor las máquinas. Los artefactos poseen una atracción inmediata. Resultan evidentes los beneficios aportados por los poderosos ingenios de nuestro mundo: aviones, submarinos, robots de soldadura, hornos y otros. Si se pudieran tomar las mismas ideas que han servido para proyectarlos y aplicar aquéllas a máquinas de tamaño minúsculo, ¿quién sabe lo que podrían ser capaces de hacer?

Cuando se especula sobre máquinas pequeñas suele pensarse en dos clases, a saber, las que remedan prototipos existentes y las que constituyen una novedad radical. En el primer caso, hablaríamos de submarinos nanométricos, con dimensiones de milmillonésimas de metro y eslora de decenas o escasos centenares de átomos. Por seguir con el ejemplo, se trataría de una máquina apta para navegar a través de la sangre, buscando células enfermas y destruyéndolas.

La novedad absoluta de la segunda clase se epitomiza en el ensamblador, propuesto por K. Eric Drexler. Esta máquina carece de contrapartida macroscópica, lo que reviste interés al considerar su aplicación práctica. De nuevo cuño, nos hallaríamos ante una máquina universal. Fabricaría cualquier estructura, a sí misma incluida, por el método de “aprehender y colocar” a escala atómica: un juego de tenazas nanométricas tomaría los átomos uno a uno de su entorno y los colocaría donde debiera. Drexler imagina una sociedad transformada por pequeñas máquinas que podrían producir, en horas y sin coste apenas, lo mismo un aparato de televisión que un ordenador. Pero la idea no deja de tener su lado oscuro. La capacidad de autorreplicación asociada al ensamblador ha despertado la pesadilla del fantasma gris: miles de nanoensambladores autorreplicándose en innumerables copias y devastando el planeta en este proceso.

¿Hay fundamento para hablar de máquinas nanométricas? ¿Son realizables? En caso afirmativo, ¿se trataría de versiones a menor escala de las habituales en nuestro mundo o funcionarían con otros principios? ¿Podrían asolar el planeta?

Para contestar a tan intrigantes cuestiones partiremos de una pregunta más sencilla: ¿en que consiste una máquina? De las muchas definiciones posibles, me quedaré con la que la describe como “un dispositivo para ejecutar una tarea”. Toda máquina nace de un proyecto, se construye siguiendo un determinado proceso, consume energía y funciona según la información recibida. Pero, ¿por qué no considerar máquina también al complejo sistema molecular que realiza una función, aunque sea producto de la evolución y no materialización de un plano?

Existen ya máquinas nanométricas en forma de componentes moleculares funcionales de las células vivas —moléculas de proteínas o ARN, agregados de moléculas, y orgánulos—, de una enorme variedad y perfección. La pregunta general de si hay máquinas nanométricas ha sido, pues, respondida afirmativamente por los biólogos. Ahora importa conocer cuáles son los planos más interesantes para fabricar las futuras máquinas nanométricas. Y discernir los riesgos que éstas podrían acarrear.

Las células alojan máquinas moleculares que recuerdan los artefactos creados por el hombre. Pensemos, por ejemplo, en el rotor fijo en la membrana de una bacteria que hace girar un eje; a primera vista parece un motor eléctrico. Otros elementos guardan una afinidad más lejana; así, la asociación de ARN y proteínas —el ribosoma— fabrica proteínas a través de un proceso similar a una cadena de montaje. Pero no faltan máquinas moleculares sin contrapartida obvia con las máquinas macroscópicas; por botón de muestra, la topoisomerasa, una enzima, desenrolla el ADN de doble cadena cuando forma un tirabuzón demasiado compacto. El modo en que estos componentes se fabrican en la célula —una síntesis eficaz de moléculas largas, combinada con el autoensamblaje molecular— constituye un modelo por su economía

El autor

GEORGE M. WHITESIDES es catedrático de química en la Universidad de Harvard. Agradece a sus colaboradores Kateri Paul y Abraham Stroock las numerosas sugerencias recibidas para la confección del artículo.



1. **FLAGELOS de la bacteria *Escherichia coli*, impulsados por motores nanométricos. El motor bioquímico impulsa un eje rotatorio que hace girar a los flagelos, y permite que el microorganismo se desplace a través del líquido.**

y organización, totalmente diferente del método de fuerza bruta sugerido por el ensamblador.

Pasemos a la aludida devastación del planeta. Hasta cierto punto, las células biológicas ya han devastado la Tierra. Antes de que surgiese la vida, el planeta era muy distinto del que observamos. Su superficie estaba formada por minerales; su atmósfera era rica en dióxido de carbono. La vida remodeló rápida y completamente el planeta: contaminó la prístina superficie con microorganismos, plantas y materiales orgánicos originados por ellos; eliminó en gran parte el dióxido de carbono de la atmósfera e inyectó enormes cantidades de oxígeno. Hubo un cambio radical. Las células —conjuntos autorreplicantes de máquinas nanométricas moleculares— transformaron por entero la superficie y la atmósfera de nuestro planeta. A ese cambio nadie le llamaría "devastación del planeta", salvo un observador exterior que podría pensar de modo distinto.

Por ello la cuestión no es si las máquinas a nanoescala pueden existir —ahí están— o si encierran interés —ninguno de nosotros se consideraría irrelevante—, sino dónde buscar nuevas ideas para su diseño. ¿Deberíamos acudir a la cadena de montaje de una gran empresa automovilística o escudriñar el interior de una célula de *Escherichia coli*?

Comparemos máquinas nanométricas biológicas, especialmente el sistema biológico autorreplicante esencial, la célula, con mecanismos nanométricos modelados según los artefactos que nos rodean. ¿Cómo funciona la estrategia biológica? ¿En qué se equipararía a una estrategia basada en la fabricación de versiones nanométricas de máquinas existentes? ¿Y a una nueva estrategia del tipo sugerido por el ensamblador?

Copiadoras moleculares

La célula es una estructura autorreplicante. Aprehende moléculas de su entorno, procesa algunas para combustible y trans-

forma otras en componentes que utiliza para sintetizar, subsistir, moverse y defenderse. El ADN almacena la información necesaria para la síntesis y el funcionamiento entre generaciones sucesivas. El ARN mensajero, o ARNm, sirve de transcripto transitorio de dicha información, “diciendo” a los ribosomas qué proteína han de fabricar. Las membranas proporcionan compartimentos que engloban las zonas de trabajo, albergan portales que controlan el flujo de moléculas hacia el interior y el exterior de la célula, y mantienen las moléculas que vigilan el entorno de la célula. A las proteínas (a menudo en cooperación con otras moléculas) les corresponde la tarea constructiva en la célula y movilizar las partes pertinentes cuando debe hacerse.

La estrategia adoptada por la célula para fabricar sus componentes —y así reproducirse y mantenerse a sí misma— se funda en dos principios. Consiste el primero en utilizar un solo proceso químico —polimerización— para sintetizar grandes moléculas lineales. El segundo es construir moléculas que espontáneamente se pliegan en estructuras funcionales tridimensionales. Esta estrategia bipolar no exige ningún proceso tortuoso de fabricación tridimensional según el método de aprehender y colocar: se limita a ensartar cuentas (por ejemplo, aminoácidos) en un collar (un polipéptido) y deja que éste se autoensamble en una máquina (una proteína). Así, la información para la estructura tridimensional funcional viene cifrada en la secuencia de cuentas. Las tres clases principales de moléculas —ADN, ARN y proteínas— se fabrican de acuerdo con esa estrategia; las proteínas se encargan luego de proporcionar el resto de las moléculas. En numerosas ocasiones, las proteínas también se asocian de forma espontánea con otras moléculas —proteínas, ácidos nucleicos y moléculas pequeñas— para constituir estructuras funcionales mayores. Como estrategia para construir complejas estructuras tridimensionales, tal método de síntesis lineal, seguido de varios niveles de autoensamblaje molecular, es probablemente insuperable en punto a rendimiento.

La célula se resume en un conjunto de catalizadores (moléculas que provocan e intervienen en las reacciones químicas sin que ellas mismas se consuman) y de otras especies funcionales, como sensores, elementos estructurales, bombas y motores. A la postre, la mayoría de las máquinas nanométricas de la célula son catalizadores moleculares. Estos catalizadores se encargan de la mayor parte del trabajo: forman los lípidos, que a su vez se autoensamblan en la lámina flexible que engloba a la célula; fabrican los componentes moleculares necesarios para la autorreplicación; producen energía y regulan su consumo por la célula; almacenan la información para registro y operatividad; y mantienen el medio interno dentro de los parámetros apropiados de funcionamiento.

Entre las diversas y maravillosas máquinas moleculares empleadas por la célula, destacaría cuatro: ribosoma, cloroplasto, mitocondria y motor flagelar bacteriano. El ribosoma, formado por ARN ribosómico (ARNr) y proteínas, resulta clave. Se encuentra en el punto de enlace entre información y acción, entre ácidos nucleicos y proteínas. Es una máquina extraordinaria en su perfección, que recoge la información presente en el ARNm y la utiliza para sintetizar proteínas.

Los cloroplastos de células vegetales y algas contienen matrices moleculares que actúan como antenas ópticas sintonizadas, recogen fotones de la luz solar y los emplean para generar combustible químico que la célula acopia para acometer muchas de sus operaciones. El cloroplasto también convierte el agua en oxígeno, que contaminó así la atmósfera cuando apareció la vida sobre la Tierra. El elemento del cual dependen nuestras vidas fue, en un principio, producto de desecho de la absorción celular de la luz.

La central celular de energía se halla en las mitocondrias. Este orgánulo lleva a cabo la combustión controlada de la glucosa y genera energía para el sistema. En su operación produce moléculas de ATP que se mueven a través de la célula por difusión y que son contribuyentes esenciales para muchas reacciones biológicas.

El motor flagelar de las bacterias es una máquina nanométrica especial. Se trata de un agregado muy estructurado de proteínas e instalado en la membrana de muchas células bacterianas. De él de-

HISTORIA DE DOS MOTORES



2. UN MOTOR ELECTRICO ESTANDAR tiene una semejanza superficial —y a la vez sorprendente— con el motor rotativo bioquímico (*arriba a la derecha*) que hace girar los flagelos en una bacteria.

pende el movimiento rotatorio que hace girar los flagelos, prolongaciones cimbreantes que, al actuar como propulsores, facilitan el desplazamiento de las bacterias por el agua. A la manera de un motor eléctrico, el flagelar consta de un eje y una carcasa. Pero la similitud entre el motor eléctrico y el flagelar es, en realidad, mera ilusión. El motor flagelar no consume corriente eléctrica para generar campos magnéticos oscilantes; antes bien, aprovecha la degradación del ATP para modificar la forma de las moléculas que, cuando se combinan con un refinado trinquete molecular, promueven el giro del eje de la proteína.

Máquinas nanométricas y artefactos humanos

¿Podríamos aproximarnos algún día al eficaz rendimiento de la maquinaria celular creando contrapartidas liliputienses de nuestros artefactos industriales? La microfabricación ha conocido la gloria de un éxito resonado en los transistores y demás componentes de los microcircuitos. La aplicación de estas técnicas a tipos sencillos de máquinas con partes móviles —osciladores mecánicos y espejos móviles— se ha resuelto con bien. El desarrollo de tales sistemas microelectromecánicos (MEMS) avanza con rapidez, pero las funciones que cumplen son elementales; además se trata de máquinas micrométricas, no nanométricas. Los primeros MEMS a escala nanométrica (NEMS, o sistemas nanoelectromecánicos), de construcción reciente, no han salido de la fase de ensayo experimental.

La fabricación de dispositivos nanométricos con partes móviles debe habérselas con problemas espinosos. Así, los de fricción y adherencia. Por ser muy grande la relación de superficie a volumen en los dispositivos pequeños, los efectos de superficie —beneficiosos o perjudiciales— adquieren una importancia mucho mayor que en los dispositivos de cierto tamaño. Algunos problemas se resolverán si merece la pena, pero de momento presentan retos técnicos harto desafiantes. Se progresará en el camino hacia máquinas micrométricas más complejas y máquinas nanométricas modeladas según los artefactos de la vida moderna, pero queda un largo trecho por recorrer antes de que podamos producir mecanismos nanométricos en cantidad suficiente para cualquier propósito práctico. Tampoco hay razones para suponer que las máquinas nanométricas se tengan que parecer a tales artefactos.

¿Podrían autorreplicarse los sistemas nanométricos? En el estado actual de nuestros conocimientos no sabemos construir máquinas autorreplicantes de ningún tipo, ni grandes ni pequeñas. Partiendo de recientes estudios biológicos, algo entendemos sobre el nivel mínimo de complejidad en una célula viva que permita la autorreplicación: un sistema de unos 300 genes basta para la autorreplicación. Muy escasas son las pistas sobre cómo traducir ese número en máquinas mecánicas de tipos más familiares a nosotros, y no tenemos ninguna sobre cómo diseñar un sistema de máquinas autorreplicante y capaz de automantenerse. Apenas hemos dado los primeros pasos hacia la autorreproducción en sistemas no biológicos [*véase* “La autorreplicación de las máquinas”, por Moshe Sipper y James A. Reggia; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre 2001].

Hay otros problemas que proyectan sombras alargadas. ¿De dónde extraer la energía para una máquina nanométrica autónoma? No existen enchufes eléctricos a escala nanométrica. Para cumplir sus funciones, la célula acude a reacciones químicas de compuestos específicos; falta por desarrollar la estrategia correspondiente para máquinas nanométricas. ¿Cómo almacenaría y utilizaría la información una máquina nanométrica autorreplicante? La biología nos revela una estrategia, basada en el ADN. Si quisiese seguir una vía diferente, no está claro por dónde empezar.

El ensamblador, con sus tenazas para aprehender y colocar en su sitio debido, esquiva muchas dificultades asociadas a la fabricación de máquinas nanométricas y a la autorreplicación. Instalando una máquina que pueda realizar cualquier composición y armar cualquier estructura con sólo colocar un átomo por vez, se orillan los aspectos más ingratos de la fabricación. El problema ahora es que a los químicos no les parece factible el ensamblador. Detengámonos en sólo dos impedimentos.

El primer inconveniente reside en las tenazas, o mandíbulas, del ensamblador. Si tienen por misión aprehender átomos con suma destreza, deberán ser menores que los átomos. Pero las mandíbulas han de estar hechas de átomos y, por tanto, son mayores que el átomo que deben asir y alojar en su sitio. (Sería como ponerse a fabricar un reloj de precisión con los dedos, sin herramientas.) El segundo inconveniente recae en la naturaleza de los átomos. Los de carbono, en particular, se unen fuertemente a sus vecinos. Se necesitaría mucha energía para extraer un átomo de su posición (un problema para el suministro de energía) y se liberaría una cuantía notable de energía cuando se situase en su lugar (un problema de enfriamiento). Y lo que reviste importancia mayor: el átomo de carbono forma enlaces con casi todo. Es difícil imaginar cómo se construirían las mandíbulas del ensamblador sin que se enlazaran los átomos al extraerlos de su material original. (Algo así como armar su reloj con partes aprovechadas de otro reloj en el que todas las piezas estuviesen revestidas con un pegamento muy adherente: si consiguiera separar las piezas, éstas se pegarían a sus dedos.)

Admitamos que se pudiese construir un submarino nanométrico, ¿funcionaría? El submarino que sale de los astilleros avanza por el agua gracias a la combinación de una hélice rotatoria —que, al girar, obliga a que el agua vaya hacia atrás y el submarino hacia adelante— y planos móviles que guían su rumbo. Las bacterias que nadan se sirven de estructuras —flagelos— que se parecen a espirales flexibles o látigos, aunque desempeñan una función similar a la de la hélice. No siguen un trayecto predeterminado, sino que avanzan sincopadamente, con un

movimiento que en el mejor de los casos tiende en la dirección general de una fuente de alimento. En los objetos nanométricos, aunque se pudiese fabricar una hélice, surgiría un nuevo problema, muy grave: el azote aleatorio de las moléculas de agua.

Las moléculas de agua serían menores que un submarino nanométrico, pero no mucho menores; su movimiento térmico es rápido a escala nanométrica. Las colisiones con ellas provocan que el objeto nanométrico rebote alrededor de las mismas con prontitud (un proceso llamado movimiento browniano) y en direcciones aleatorias; cualquier esfuerzo por tomar un curso definido se frustraría ante las continuas colisiones con moléculas de agua que se moviesen con celeridad. Los navegantes nanométricos tendrían que adaptarse a las tormentas brownianas que impactarían contra sus cascos. Para naves en la escala de aproximadamente 100 nanómetros, el destino de la mayoría de las singladuras dependería del azar, porque probablemente el ingenio sería imposible de gobernar, al menos en el sentido familiar para un marino. Las células del torrente sanguíneo —con una masa de 10 a 100 veces mayor que un submarino nanométrico— no se guían en ese medio, sino que proceden dando tumbos. En el mejor de los casos, un submarino nanométrico podría anhelar seleccionar una dirección general, no un destino específico. Con independencia de que pudieran construirse o gobernar dispositivos nanométricos, no desempeñarían las refinadas tareas exigidas en la detección de una enfermedad.

Ciertos apartados de la estrategia del "submarino nanométrico" para detectar y destruir células enfermas en el cuerpo, como células cancerosas, habría que ordenarlos hacia la detección de la presa. Para cumplir tal misión, deberían probablemente imitar aspectos del sistema inmunitario del cuerpo humano. El reconocimiento de una célula como "normal", "patógena" o "cancerosa" es un proceso de sutilísima complejidad en el que toman parte todos los componentes del sistema inmunitario, incluidas miles de millones de células especializadas. En la superficie de la mayoría de las células cancerosas no aparecen etiquetas señalizadoras de su peligro. En muchas de sus características no se distinguen de las células normales. Un submarino nanométrico en misión de caza y muerte de células cancerosas tendría que llevar a bordo un pequeño laboratorio de diagnóstico; laboratorio que dejaría de ser pequeño, pues necesitaría dispositivos de muestreo, reactivos, cámaras de reacción e instrumentos analíticos. Para operar precisaría también energía. Las células del sistema inmunitario utilizan los mismos nutrientes que las otras células; un submarino nanométrico probablemente tendría que hacer lo mismo.



3. RIBOSOMA leyendo en una cadena de ARN (*morado*) para obtener instrucciones de acuerdo con las cuales encadenar los aminoácidos que constituyen una proteína (*dorado*). Este proceso de ensamblaje trae a la mente los soldadores robóticos de una fábrica de automóviles (*página opuesta*).

Mejor que la evolución

Terminarán por fabricarse máquinas pequeñas, a buen seguro. Ocurre, sin embargo, que carecemos de la estrategia a seguir para su construcción y no sabemos bien qué cometidos asignarles. La biología proporciona un conjunto brillante de ejemplos elaborados de mecanismos nanométricos y sus funciones sutiles. Pero existe un abismo entre las estrategias utilizadas en estas máquinas nanométricas y las empleadas en la industria.

Al especular sobre el método apropiado para fabricar máquinas nanométricas, hemos de contar con dos estrategias limitantes. Consiste la primera en fijarse en los mecanismos celulares, para aprender de ellos. Nos ofrecen principios que permitirán realizar las variaciones que servirán a nuestro objetivo y otras que tendrán funciones nuevas. La ingeniería genética ya está avanzando por este camino. El desarrollo de nuevos tipos de química nos puede facilitar la aplicación de principios biológicos en sistemas moleculares que no son proteínas ni ácidos nucleicos.

La segunda estrategia estriba en partir de cero y desarrollar nuevos tipos fundamentales de sistemas nanométricos. La biología ha creado un medio práctico para la fabrica-



ción y la síntesis de máquinas nanométricas operativas, y no hay razón para creer que no existan otros. No será éste un camino de rosas. Habrá que desechar por inviable, si no imposible, pretender construir máquinas nanométricas mediante la miniaturización de escalas y procesos de las máquinas que nos rodean. El mecanizado y la soldadura no tienen cabida en tamaños nanométricos. Tampoco la tienen el desplazamiento en línea recta a través de un fluido o la generación de campos magnéticos con electroimanes. Las técnicas diseñadas para fabricar dispositivos electrónicos seguramente podrán fabricar algunos tipos sencillos de dispositivos mecánicos nanométricos, pero sus prestaciones serán muy limitadas.

El sueño del ensamblador, que parece sortear tantas dificultades, mantiene un encanto seductor. Se trata de un espejismo. Alejado de la realidad, constituye la esperanza de un milagro más que la solución de un problema. Considerando las muchas limitaciones relativas a la fabricación y el funcionamiento de las máquinas nanométricas, los nuevos sistemas para construirlas se podrían asimilar a los sistemas biológicos, de larga historia. Será un desafío maravilloso ver si podemos superar la obra de la evolución. Y todo un hito, imitar la célula viva más sencilla.

¿Hemos de suponer, pues, que las máquinas biológicas nanométricas señalan el final del camino? ¿Son las estructuras mejor optimizadas que pueden darse? ¿Ha considerado la evolución todas las posibilidades para alcanzar la mejor? No hay respuesta general para esta pregunta. Jeremy R. Knowles, de la Universidad de Harvard, ha establecido que una enzima —triosa fosfato isomerasa, o TIM— es “perfecta”: es decir, un catalizador que fabricásemos para la reacción específica promovida por esta enzima no podría ser mejor. No nos hemos esforzado en descubrir opciones alternativas de la mayoría de las enzimas y estructuras más complicadas que ellas.

Las estructuras biológicas trabajan en medio acuoso. Acostumbran desenvolverse dentro de un estrecho intervalo de temperaturas y concentraciones salinas. En general no conducen bien la electricidad (aunque cloroplastos y mitocondrias mueven electrones con suma habilidad). Ni realizan cálculos binarios, ni poseen un particular vigor mecánico. Por consiguiente, si las máquinas nanométricas han de triunfar en entornos no biológicos habrá que inventar muchos tipos de funciones.

¿Y qué hemos aprendido de todo esto sobre la amenaza apocalíptica del ogro gris? Si encerrasen algún peligro las máquinas nanométricas, dimanaría de su capacidad de autorreplicación. Para que un sistema sea autorreplicante debe contener toda la información que necesita tal proceso y recoger del entorno los materiales a emplear y la energía que le permita llevarlo a cabo. También ha de poder fabricar y ensamblar (o dejar ensamblar) las piezas requeridas para crear la copia. La biología ha solucionado todos estos problemas; los sistemas biológicos autorreplicantes —desde las bacterias patógenas hasta las células cancerosas— *son* un peligro para nosotros. En los sistemas informáticos, las cadenas autorreplicantes de “bits” (virus de ordenador), aunque no son objetos materiales, nos provocan enojosas molestias, pero son sólo un peligro indirecto para nosotros.

Habría que sentirse preocupados si un sistema nuevo —cualquier sistema— fuera capaz de autorreplicarse recabando materiales de su entorno. Sabemos, sin embargo, cuán lejos nos hallamos de obtener la autorreplicación en un sistema no biológico. La fabricación basada en el ensamblador no es, en mi opinión, ninguna estrategia operativa; en consecuencia, tampoco motivo de preocupación. No se adivina en el horizonte el espectro de un fantasma gris. Si andando el tiempo surgieran robustas estructuras autorreplicantes micrométricas (o quizá nanométricas), se trataría, probablemente, de sistemas químicos tan complejos como las bacterias primitivas. Cualquiera de estos sistemas sería, a la vez, un logro increíble y una fuente de reflexión. La amenaza no vendrá de ensambladores enloquecidos, sino de sistemas hoy inimaginables de reacciones autocatalíticas.

Por tanto, son la biología y la química, y no los manuales de ingeniería mecánica, los focos hacia donde deberíamos mirar en busca de respuestas. También de aquéllas podrían venir temibles organismos o dispositivos dotados de capacidad de multiplicarse sin control.

De la microtécnica a la nanotécnica

Los defensores de la técnica nanométrica descubren cuán difícil les está resultando desarrollar robots minúsculos que puedan tratar enfermedades o realizar un proceso de fabricación limpia

Steven Ashley

La idea de poder ensamblar desde ordenadores hasta caviar, a partir de moléculas individuales, cambiaría el mundo, siempre y cuando alguien encontrase la forma de llevarla a la práctica. Dirijamos la atención hacia los ensambladores nanométricos: brigadas de robots de decenas de nanómetros con brazos manipuladores robóticos que "aprehenden y colocan en su sitio". Bajo el control superior de un potente ordenador, estos dispositivos elementales se encargarían de encajar bloques de moléculas para hacer copias de sí mismos; las réplicas construirían a su vez otras; éstas, otras, y así sucesivamente en una progresión exponencial. Entonces se podrían dirigir estos equipos de construcción para que realizasen tareas sorprendentes, como curar enfermedades desde el interior del cuerpo, y fabricasen materiales de complicado diseño a partir de materias primas con un coste extraordinariamente bajo.

Durante años K. Eric Drexler y su colega Ralph C. Merkle, criptógrafo, alimentaron esta visión futurista, sirviéndose de simulaciones por ordenador de engranajes, bombas y otros subsistemas de máquinas moleculares a escala nanométrica. En las imágenes resultantes, las esferas coloreadas indican la posición de cada átomo integrante. Se levantaron críticas sobre la viabilidad real de tales simulaciones. Una cosa era, se aducía, las representaciones digitales y otra los objetos de un mundo en interacción a través de complejas fuerzas de enlace químico en el entorno de la escala nanométrica, donde no siempre se aplica la física macroscópica y a



FABRICACION DESCENDENTE es un camino que Zyvex está siguiendo para el proceso de fabricación molecular.

menudo prevalece la mecánica cuántica.

En 1999, Merkle decidió abandonar su trabajo en el Centro de Investigación de Xerox en Palo Alto para dar existencia real a sus construcciones informáticas. Se unió al magnate del software James R. Von Ehr II, un admirador de las ideas de Drexler, que había decidido gastar parte de la millonaria fortuna allegada con la venta de Altsys, para fundar la primera compañía de "nanotécnica molecular".

Zyvex, la empresa fundada por Von Ehr en Richardson, Texas, apunta alto. "Nos encantaría ser los Applied Materials de los robots nanométricos", afirma, refiriéndose al líder de los fabricantes mundiales de equipos de semiconductores. Pero su criatura aún anda en los primeros balbuceos. Ha experimentado cuán difícil resulta trasladarse desde máquinas basadas en software hasta un ensamblador nanométrico con existencia tangible. Ha habido ya que olvidarse de la construcción átomo a átomo. A largo plazo se pretende ahora fabricar sistemas nanométricos a partir de macromoléculas o bloques de moléculas. Con ese objetivo, en su laboratorio se está experimentando con el método ascendente para fabricar ensambladores con nanotécnica molecular, aprendiendo a unir estructuras molécula a molécula, ayudados por microscopios de fuerza atómica y similares.

A corto plazo, los investigadores de Zyvex están desarrollando sistemas microelectromecánicos (MEMS), cuyas estructuras miden decenas de micras. Los dispositivos MEMS se fabrican de acuerdo con un método descendente. Se modelan litográficamente y se graban en sustratos de silicio u otros materiales.

Richard Feynman predijo que podrían emplearse esas máquinas mayores para fabricar otras menores. Y en eso andan los MEMS. Para Merkle, los métodos de fabricación de los MEMS podrían aplicarse para construir brazos de ensamblaje robóticos. Estas "manos" microelectromecánicas pueden ensamblar manos submicroscópicas, capaces de construir otras menores, y así sucesivamente, paso a paso hasta que se logre el límite inferior en miniaturización mecánica: el ensamblador nanométrico. Para que Zyvex consiga este objetivo, los robots MEMS deben reducirse aproximadamente mil veces. En cuanto se haya cumplido el requisito de



la reducción, los nanorrobots, así se prevé, servirán para la "fabricación atómicamente exacta" de cualquier cosa. Tales constructores universales podrían fabricar un reloj Rolex, luego una memoria de ordenador y después máquinas nanómetricas aplicadas a la curación del cáncer.

En su camino hacia la robótica nanométrica, Zyvex se guía por un doble principio. En el ensamblaje posicional, los manipuladores mecánicos asen y alojan con precisión los componentes del montaje. Cuando se trabaja a escalas de decenas de nanómetros, el control exacto de la posición significa mover macromoléculas o bloques de moléculas hasta el sitio deseado y forzar su engarce de acuerdo con un patrón.

La máquina capacitada para construir de abajo arriba, sirviéndose de moléculas o trozos de moléculas de su entorno, requerirá dominar otra técnica decisiva, a saber la de autorreplicarse. Si no se dispone de ejércitos enteros trabajando, se tardaría mucho tiempo en construir cualquier objeto macroescalar molécula a molécula. Sostienen en Zyvex que no haría falta lograr una máquina totalmente autorreplicante para construir un ensamblador. Pese a ello, la tarea seguiría siendo descomunal.

¿Cómo consigue Zyvex un ensamblador? La empresa acaba de firmar un contrato de colaboración con Standard MEMS, dedicada a la fabricación de microsistemas. De acuerdo con el proyecto conjunto, desarrollarán brazos prensiles formados litográficamente a escala microscópica que puedan ensamblar dispositivos menores a partir de piezas "activas", situadas con precisión y producidas en obleas de silicio. "Lograda la exactitud de posición, al brazo sólo le queda extenderse y asir la pieza. No se necesita un sistema elaborado de sensores", explica Merkle.

Von Ehr declara, a su vez, que Zyvex ha desarrollado un método con el que el manipulador puede separar partes del sustrato de suerte que estén listas para el microensamblaje mediante conectores de presión autocentrantes, una propiedad útil aunque no radicalmente novedosa. Las partes del manipulador se prepararían por litografía. Se grabarían sobre un sustrato, para luego separarlas de éste a fin de que pudiesen agarrarse con el manipulador MEMS y fijarse al dispositivo, encajándolas en su sitio. Confía Von Ehr en que estos manipuladores MEMS se convertirán en una técnica intermedia, que podría comercializarse aplicada por ejemplo a un dispositivo encargado de alinear un cable de fibra óptica.

Pero es difícil encontrar alguien en el campo de los MEMS interesado en esa técnica. Ni se adivina qué clase de producto podría fabricarse realmente, apunta Kaigham J. Gabriel, profesor de ordenadores y robótica en la Universidad Carnegie Mellon que antaño dirigió el programa MEMS en la Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación para la Defensa.

Mientras tanto, ¿qué pasa con el ensamblador nanométrico? Merkle aventura que se tardará un decenio o dos en lograr el control molecular. Zyvex tiene, pues, trabajo por delante. La comunidad científica no ve con excesiva simpatía su proyecto. No aparece, objetan, ninguna prueba experimental de que pueda materializarse alguna parte del esquema. A ello responde Merkle que nada de lo que Zyvex se propone contradice las leyes de la física.

Juan M. R. Parrondo

Las matemáticas del aprendizaje y la generalización

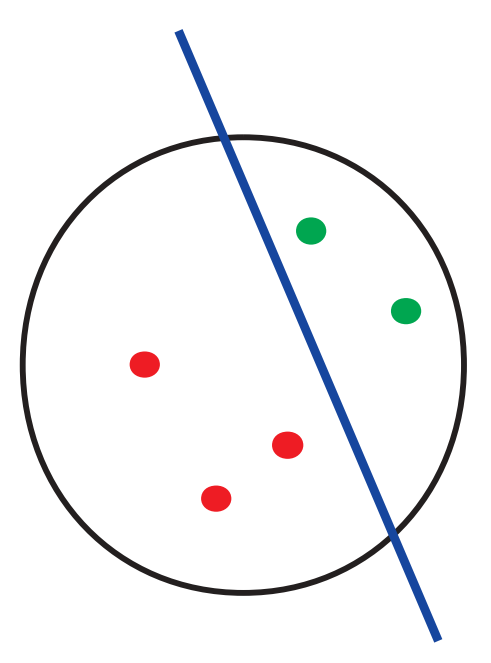
Anselmo Tajante es un tipo al que no le gustan las medias tintas. Para él las personas son simpáticas o antipáticas, inteligentes o necias, generosas o tacañas, diligentes o perezosas. Tajante es, además, un tanto limitado: sólo dispone de estas cuatro categorías para clasificar a las personas que conoce. Para él, su amiga Alicia es simpática, inteligente, tacaña y perezosa, y su primo Bruno es antipático, inteligente, tacaño y diligente. De este modo, cada individuo puede ser codificado mediante un número con cuatro dígitos binarios, en donde el primero es un 1 si la persona es simpática y un 0 si es antipática; el segundo dígito es un 1 si la persona es inteligente y un 0 si es necia, y así sucesivamente. Alicia estaría codificada, para la reducida capacidad de apreciación de Anselmo, con el número 1100, y Bruno con el 0101. Como sólo existen $2^4 = 16$ números con cuatro dígitos binarios, Tajante es capaz de distinguir únicamente entre 16 categorías "psicológicas".

Esta sensibilidad tan tosca le facilita enormemente la generalización a partir de unos pocos ejemplos. Supongamos que Tajante se encuentra con Mister Dull, un inglés que dispone del mismo conjunto de categorías psicológicas. Para Dull no será muy difícil "enseñar" a Tajante el significado de los términos *lazy* (perezoso) y *diligent* (diligente) a través de ejemplos. Suponiendo que Dull conozca también a Alicia y a Bruno, y tenga la misma opinión de ellos, señalaría a ella como *lazy* y a él como *diligent*. Con estos datos, Tajante descartaría de su repertorio de categorías a los binomios inteligente-necio y generoso-tacaño. Con unos pocos ejemplos más, incluso tomados al azar, Tajante acabaría por deducir el significado de *lazy* y *diligent*.

El método de aprendizaje a través de ejemplos se utiliza ampliamente en el campo de la inteligencia artificial. Supongamos que queremos diseñar un programa de ordenador o un dispositivo que decida, a partir de una serie de datos, si una persona padece o no una determinada enfermedad. Una tarea como ésta puede resultar tan complicada, que sea prácticamente imposible diseñar un algoritmo que la lleve a cabo.

Una alternativa al diseño de algoritmos es utilizar un sistema capaz de realizar muchas clasificaciones y escoger una de ellas a través de ejemplos. Normalmente se emplea una red neuronal, que es un conjunto de pequeñas unidades de procesamiento conectadas entre sí. Dependiendo de la estructura y la intensidad de las conexiones, la red clasifica los datos de entrada de una u otra forma. No nos interesa ahora el funcionamiento detallado de una red neuronal. Lo único importante es que se trata de un dispositivo con un repertorio de clasificaciones y que podemos "enseñarla" a través de ejemplos: se toman los datos de una serie de individuos que se sabe si han contraído o no la enfermedad y se modifican las conexiones de la red de modo que los clasifique correctamente, esperando que así sea capaz de extraer las pautas que se esconden tras los ejemplos y clasifique correctamente a nuevos pacientes.

El procedimiento es idéntico al seguido por Dull para hacerle entender a Tajante el significado de *lazy*. Y, al igual que ocurría entonces, la rapidez con la que la red aprende es mayor cuanto menor sea su repertorio de clasificaciones. La diferencia con la historia de Dull y Tajante es que los dos compartían el mismo repertorio de clasificaciones, con lo cual el aprendizaje acaba siempre en la solución correcta. Por el contrario, en el caso de la red neuronal, la clasificación que queremos conseguir es parte del mundo real. Debemos, por tanto, asegurarnos de que el repertorio de clasificaciones de la red es suficientemente amplio como para contener la clasificación deseada, pero al mismo tiempo, suficientemente reducido como para que la red pueda "aprender" o "generalizar" a partir de un número limitado de ejemplos.



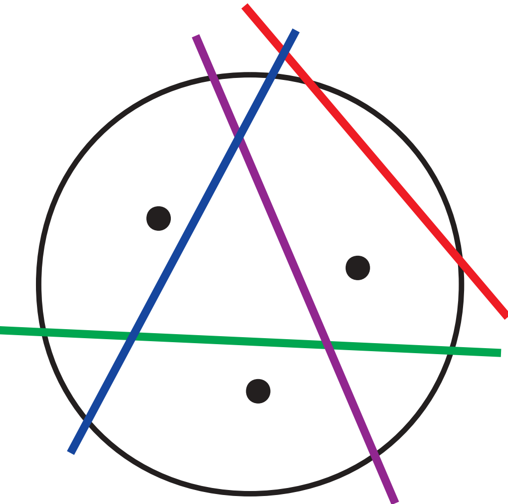
1. La secante define dos clasificaciones en el círculo: una que asigna 1 a los puntos verdes y 0 a los rojos y otra que asigna 0 a los verdes y 1 a los rojos

La teoría de la generalización estudia la capacidad de aprendizaje de un repertorio de clasificaciones a partir de ejemplos y a ella pertenece un concepto matemático fascinante por su universalidad: la dimensión de Vapnik-Chervonenkis (VC). La dimensión VC es un número que caracteriza la capacidad de generalización de cualquier repertorio de clasificaciones, aunque sea un repertorio infinito. Veamos con detalle en qué consiste.

Volvamos de nuevo a Tajante y al modo como clasifica a Alicia y a Bruno. Vimos que Alicia era simpática y Bruno antipático; así, con respecto a la clasificación simpático-antipático, a Alicia le corresponde un 1 y a Bruno un 0. A los posibles resultados de las clasificaciones que se pueden hacer con una serie de ejemplos se les llama dicotomías. La clasificación simpático-antipático en Alicia y Bruno crea la dicotomía 10. La clasificación inteligente-necio crea la dicotomía 11. Y las clasificaciones generoso-tacaño y perezoso-diligente crean, siempre en Alicia y Bruno, las dicotomías 00 y 01, respectivamente. El número de posibles dicotomías con dos personas es 4 y el repertorio de clasificaciones de que dispone Tajante es capaz de reproducirlas.

Pero si añadimos una tercera persona, el número de dicotomías posibles es $2^3 = 8$ y el repertorio de clasificaciones de Tajante es ahora incapaz de reproducirlas todas. Pues bien, la dimensión de Vapnik-Chervonenkis es el número de ejemplos a partir del cual el repertorio es incapaz de reproducir todas las dicotomías posibles. La dimensión VC de Tajante es, por tanto, 2.

Quizá le parezca al lector que el concepto es demasiado simple y que la dimensión VC es siempre el número n tal que 2^n es igual al número de clasificaciones disponibles en el repertorio. Sin embargo, no es así: la dimensión VC puede ser mucho menor que ese número n. Incluso un repertorio con infinitas clasificaciones puede tener una dimensión VC finita. Veamos un ejemplo. Los objetos a clasificar son los puntos de un círculo y las clasificaciones disponibles son las definidas por las secantes al círculo. En la figura 1 se muestra un ejemplo: la recta secante define dos clasificaciones, una opuesta de la otra, según los puntos estén a un lado u otro de dicha recta.



2. Las 8 dicotomías de tres puntos: la secante roja crea las dicotomías 000 y 111, la secante verde la 001 y la 110, la morada la 010 y la 101, y la azul la 100 y la 011

La dimensión VC de este repertorio de clasificaciones es 3, a pesar de que el número de secantes, y por tanto el número de clasificaciones, es infinito. La demostración no entraña especial dificultad. En la figura 2, pueden verse las ocho dicotomías sobre 3 puntos del círculo creadas por ocho clasificaciones definidas mediante cuatro secantes (recordemos que cada secante define dos clasificaciones). Por ejemplo, la secante azul define las dicotomías 100 y 011 (el orden de los puntos en las dicotomías es el siguiente: el primer punto es el superior izquierdo, el segundo el superior derecho y el tercero el inferior). El lector puede demostrar que es imposible encontrar cuatro puntos en el círculo y ocho secantes que reproduzcan las 16 dicotomías posibles. Por ello concluimos que la dimensión VC de las secantes es precisamente 3.

Como vemos en este ejemplo, la dimensión VC capta las limitaciones del repertorio de clasificaciones para clasificar puntos de modo arbitrario. A partir de cuatro puntos, las secantes son incapaces de reproducir las $2^4 = 16$ dicotomías posibles. Pero hay algo aún más fascinante en la dimensión VC. Como se deduce de la definición, el número máximo de dicotomías para l puntos es 2^l si l es menor que la dimensión VC. ¿Qué ocurre para un número de puntos mayor? Vapnik y Chervonenkis demostraron que, para cualquier repertorio de clasificaciones, el número máximo de dicotomías, para l mayor que la dimensión VC, depende de l como una potencia, más concretamente, como l elevado a la dimensión VC. Es decir, el número de dicotomías crece exponencialmente hasta la dimensión VC y, para un número de puntos superior, el crecimiento se reduce drásticamente (un crecimiento exponencial es siempre mucho mayor que uno en forma de potencia; basta comparar, por ejemplo, 2^{10} con 10 elevado a un número no muy grande). Lo más sorprendente es que este resultado es completamente general, válido para cualquier repertorio de clasificaciones, desde el que posee una red neuronal hasta el que pueda albergar su cerebro o el mío.

Vapnik y Chervonenkis demostraron también que el número de ejemplos necesario para que un dispositivo generalice, es decir, para que encuentre de forma unívoca la clasificación que corresponde a los ejemplos presentados, es del orden de la dimensión VC. Este resultado se aplica en la teoría del aprendizaje de redes neuronales y también en estadística matemática.

El cálculo de la dimensión VC es bastante difícil y, en la mayoría de los casos, sólo puede hacerse de modo aproximado. Pero la profundidad del concepto y la generalidad de los teoremas de Vapnik-Chervonenkis los convierten en uno de los logros más interesantes de la matemática de la segunda mitad del siglo XX.

parr-km0@seneca.fis.ucm.es

Curiosidades de la física

Wolfgang Bürger

Agilidad del gato

Maniobra de seguridad: Si se agarra un gato por sus cuatro patas, panza arriba, y se le deja caer, girará en menos de medio segundo alrededor de su propio eje y amortiguará el golpe contra el suelo con las patas estiradas. Da la sensación de que, tras ese giro de 180 grados, no cambiará de postura hasta poner las patas sobre el suelo.

El animal ha de actuar con rapidez. Al cabo de medio segundo, la velocidad de su centro de gravedad alcanza los 18 kilómetros por hora. Mientras que la velocidad de caída "sólo" crece proporcionalmente con el tiempo, la energía cinética del gato lo hace mucho más deprisa y, con ésta, aumenta el peligro de que se lesione en un aterrizaje desgraciado.

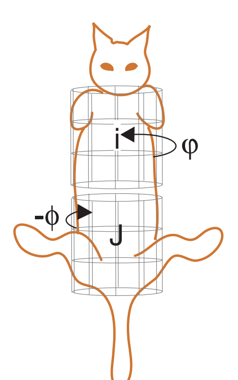
Lo que sucede en tan breve lapso de tiempo pasa con vertiginosa rapidez ante nuestros ojos, incapaces de captar los pormenores. Según informaciones de algunos biólogos, el instinto de girarse para caer de pie lo comparten los gatos con liebres, perros, conejos y monos. No lo he comprobado.

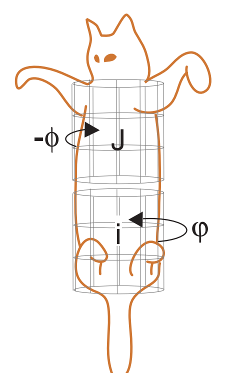
Convocatoria pública: Desde tiempo inmemorial el hombre ha observado esa habilidad gatuna, pero sólo en 1894 comenzó a considerarla un "problema científico". La Academia de Ciencias de París convocó un concurso público sobre la "explicación física de cómo consigue el gato aterrizar siempre de cuatro patas al caer desde una gran altura". A los expertos en mecánica les parecía que el giro se debía al empuje impartido al animal al soltarlo, que así conseguiría un momento angular en uno u otro sentido. El gato, durante su caída, sólo podría girar parte del cuerpo moviendo simultáneamente otra parte en sentido contrario, de suerte que se compensasen los dos momentos angulares. El momento angular total siempre se conserva; si al principio era cero, no podía aparecer de la nada momento alguno. Además, para poner simultáneamente las patas delanteras y traseras sobre el suelo, debería girar su cuerpo una vuelta entera, lo que, según lo observado, no era el caso.

Pero esa hipótesis del empuje se rechazó tras meticulosos experimentos en los que, antes de la caída, se ataron cordeles a las patas por separado. Cabe admitir que del intercambio con el aire del entorno tampoco se extrae un momento angular suficiente: aun cuando el gato se agitara con violencia, las fuerzas aerodinámicas ascensionales y de fricción no podrían aportar el empuje necesario para girar.

Muchos interrogantes: Hasta hoy persiste el prejuicio de que consigue el giro a lo largo de su eje remando vigorosamente con la cola en sentido contrario. De entrada no es una idea descabellada, en un animal que se sirve de ese apéndice para los movimientos de equilibrio. Pero en este caso una cola considerable debería rotar como una hélice. Los experimentos realizados con gatos sin cola muestran que giran con la elegancia de los que sí la tienen.

Y aunque se hubieran resuelto todas las cuestiones físicas quedaría pendiente la fisiología de la adquisición del impulso y el control del movimiento. Los biólogos han dejado caer gatos, con los ojos tapados o en recintos oscuros, desde alturas que los animales no podían conocer de antemano. Los individuos sanos siempre caían de pie. Sólo perdieron tal habilidad cuando se les extirpó quirúrgicamente





El giro de un gato durante su caída

Giro en dos tiempos: El cuerpo del gato permanece estirado. En el primer tiempo acerca sus patas delanteras al eje del cuerpo y estira las traseras hacia los lados. Las mitades del cuerpo anterior y posterior tienen entonces unos momentos de inercia axiales i y J de diferente magnitud, donde i es menor que J. Supongamos que i y J permanecen constantes durante cierto tiempo. Si la mitad delantera gira un ángulo φ en un sentido, la trasera lo hará un ángulo Φ en sentido contrario. Por hipótesis, los dos momentos angulares se compensan; por ello, en todo instante $i\varphi = J\Phi$. En el segundo tiempo sucede el mismo giro, aunque intercambiando los papeles. Al final, ambas mitades del cuerpo han girado una diferencia de ángulo $\varphi - \Phi = (1 - i/J)\varphi$. Si φ es suficientemente grande y el gato logra que la relación i/J de los momentos de inercia sea pequeña, puede girar unos 180 grados de una sola vez. En realidad, el gato no está compuesto sólo de dos mitades, sino que se retuerce desde la cabeza hasta la cola.

Giro como una peonza: Modelamos las partes delantera y trasera del gato con dos rotores cilíndricos cuyos ejes estén torcidos un ángulo $\pm\alpha$ respecto a la horizontal y se hallen unidos entre sí por una especie de articulación de Cardán. (Una aproximación algo torpe a un gato con la espina dorsal encorvada.) Ambos rotores giran con la misma velocidad angular ω alrededor de su correspondiente eje. Las componentes verticales de los momentos angulares, de tamaño $\pm A\omega$ sen α (A es el momento de inercia axial de un rotor), son iguales y de sentido contrario; por tanto, se compensan. Las componentes horizontales, cada una de tamaño $A\omega \cos \alpha$, se aña-

el laberinto del oído interno junto con el órgano del sentido del equilibrio.

Fotografía de alta velocidad: En el año mencionado de 1894, Etienne Jules Marey presentó dos secuencias de imágenes, desde distinta perspectiva, de la caída de un gato. Se trataba de una representación espacio-temporal del giro que acometen moviendo partes de su cuerpo en sentido opuesto. Marey, pionero de la cinematografía aplicada a la biología, inventó en 1890 una cámara que podía tomar sesenta imágenes por segundo y que ya utilizó con éxito en el vuelo de las aves. Cuando proyectó seis veces más despacio, "como una lupa temporal", la secuencia de imágenes con un "zoótropo", el ojo las percibía todavía sin solución de continuidad, a modo de "película".

La proyección de la película desató una tormenta en la Academia. Algunos físicos dudaron de lo que veían: por principio, era imposible que un cuerpo que cayera adquiriese un giro por sí solo.

El giro en dos tiempos: A partir de esas imágenes, Marey supuso que el gato giraba en dos tiempos. En el primero, extendía sus patas traseras perpendicularmente al eje del cuerpo (con lo que aumentaba el momento de inercia de la mitad trasera del cuerpo para el giro axial), mientras que simultáneamente plegaba sus patas delanteras hacia el eje (y reducía el momento de inercia axial de la mitad delantera del cuerpo). Si el gato giraba en un sentido su mitad delantera, rotaba su mitad trasera en sentido opuesto, pero más despacio, en relación inversa a los momentos de inercia.

En un segundo tiempo el felino estiraba las patas delanteras transversalmente y recogía las patas traseras a lo largo, para que la parte trasera girara con ángulo mayor. El resultado final era que las dos mitades habían girado en idéntico sentido aproximadamente la misma diferencia de ángulo.

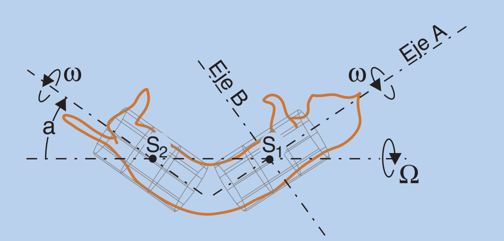
La convocatoria de la Academia tuvo un efecto inmediato. El problema apareció incluso en los manuales e indujo a los físicos a pensar sobre giros sin momento en el espacio. De unos decenios a esta parte, el tema ha vuelto a ponerse de moda por su aplicación potencial en el deporte (saltos gimnásticos), en la acrobacia circense (plinton, trapecio) y en los viajes espaciales.

El gato como peonza: Los gatos dominan además otros trucos para caer de cuatro patas. En una serie de fotografías de la revista *Life*, que en 1969 T. R. Kane y M. P. Scher tomaron como base de su análisis, no se pudo reconocer en el animal ningún giro del cuerpo durante la caída. Antes bien, doblaba su espinazo a la altura de la cadera. Los autores, en su modelo matemático, asimilaron el gato a dos rotores que girasen con la misma velocidad angular, cuyos ejes de giro formaran un ángulo. Si estuviera recta la espina dorsal, y los ejes por ende en una misma línea, no podría el animal girar efectivamente así, sin un momento angular externo.

Imagínese el otro caso extremo: el gato podría doblar su cuerpo como si se tratara de una navaja de bolsillo. Se pliega al principio de la caída, tripa con tripa, rota ambas mitades una contra la otra media vuelta, hasta que estén espalda contra espalda, se abre y ya tiene las patas hacia abajo. Si, además, ambas mitades del cuerpo tienen el mismo momento de inercia, sus respectivos momentos angulares se compensarán.

El caso normal se halla entre estos dos extremos. Los momentos angulares no se compensan totalmente. Para compensar el momento angular restante aparece entonces un giro contrario del cuerpo del gato que se parece a la precesión de una peonza. Si se suelta al felino sin giro alguno, empezará a girar en el instante en que ponga en marcha sus rotores, y finalizará, con igual rapidez, en cuanto los vuelva a detener.





den a un giro alrededor del eje que pasa por los centros de masa (baricentros) S_1 y S_2 de ambos rotores. Por hipótesis, el gato tiene un momento igual a cero; en consecuencia, el momento angular debido a los rotores se compensará con un giro de retroceso del cuerpo a una velocidad angular adecuada. Cada rotor tiene, durante el giro alrededor del eje que une los baricentros, un momento de inercia $A\cos^2\alpha + B\,\mathrm{sen}^2\alpha$, donde B es el momento de inercia alrededor del eje transversal. Después de un cierto tiempo t, los rotores han girado un ángulo $\varphi = \omega t$ y —compensando— el gato entero un ángulo $\Phi = \Omega t$. Entre φ y Φ existe la misma relación que entre las velocidades angulares ω y Ω y entre éstas, salvo el signo, una relación inversamente proporcional a los momentos de inercia. El giro efectivo del gato ocurre con el ángulo

$$\varphi - \Phi = \varphi\left(1 - \frac{A\cos\alpha}{A\cos^2\alpha + B\,\mathrm{sen}^2\alpha}\right)$$

Un gato estirado ($\alpha = 0$) no puede girar de esta manera ($\varphi = \Phi$). El gato con espalda encorvada ($\alpha > 0$) gira más deprisa cuanto mayor sea α. Para un gato doblado al estilo de una navaja de bolsillo ($\alpha = \pi/2$) no aparece ningún giro de retroceso ($\Phi = 0$).

IDEAS APLICADAS

Mark Fischetti

Tratamiento antipulgas

Champús, polvos, pulverizadores y collares pretenden todos controlar las pulgas de nuestros animales de compañía, pero los tratamientos hoy más en boga son las medicaciones locales o "directas". Exprimiendo unas cuantas gotas sobre la piel del lomo de un gato o un perro, el insecticida mantendrá a raya a las pulgas durante un mes. Estos productos sólo pueden adquirirse en establecimientos regidos por facultativos autorizados, en dosis ajustadas al peso de cada animal.

Los fármacos se esparcen mezclándose con los fluidos cutáneos del animal, que migra merced al movimiento del cuerpo y la gravedad. Algunos productos fluyen a las glándulas sebáceas de los folículos capilares, donde se almacenan y secretan al paso del tiempo. Imidacloprid y fipronil se despliegan por todo el cuerpo en menos de 12 horas y, para entonces, ya han matado más del 90 por ciento de las pulgas. Los ensayos con imidacloprid muestran que, al cabo de 28 días, las concentraciones en el cuerpo de un perro disminuyen hasta una exigua parte por millón; para matar pulgas se necesita menos de una décima parte de esa cantidad, según parece. A diferencia de los tratamientos que se adhieren al pelo del animal, los compuestos de aplicación directa no se desprenden fácilmente.

Podemos administrar píldoras antipulgas para introducir la sustancia en su corriente sanguínea. Pero una pulga deberá picar al animal para exponerse al insecticida. Hay píldoras que no matan a las pulgas adultas, pero inutilizan los huevos. Los tratamientos directos matan prácticamente todas las pulgas en 18 horas e impiden la puesta de huevos. Los usuarios deben precaverse frente a los preparados piratas, muchos de los cuales contienen permetrina, que es menos eficaz con los perros y tóxica para los gatos.

Pese a quienes objetan que los animales podrían perjudicarse ingiriendo pequeñas cantidades de los tratamientos directos cuando se acicalan con la lengua, los ensayos abordados por la Agencia para la Protección del Medio Ambiente revelan que los animales que habían recibido incluso grandes sobredosis no presentaban cambios en sus constantes renales y hepáticas. Según los fabricantes, los ingredientes activos no afectan a las personas.

Ningún insecticida es inocuo al 100 por ciento. Pero seamos escépticos sobre las alternativas "naturales" o "sin química", tales como la vitamina B o el ajo. Son escasas las pruebas científicas de que las pócimas ahuyenten a las pulgas.

1. LOS TRATAMIENTOS LOCALES se combinan con los fluidos cutáneos. Unas pocas gotas se dispersan enseguida, según corroboran las pruebas con las dosis recomendadas de fipronil. Y aunque las concentraciones sean ya bajas al cabo de 56 días, siguen siendo lo bastante altas para matar pulgas (el 95 por ciento de éstas mueren bajo la exposición a 0,7 microgramos por gramo de pelaje).

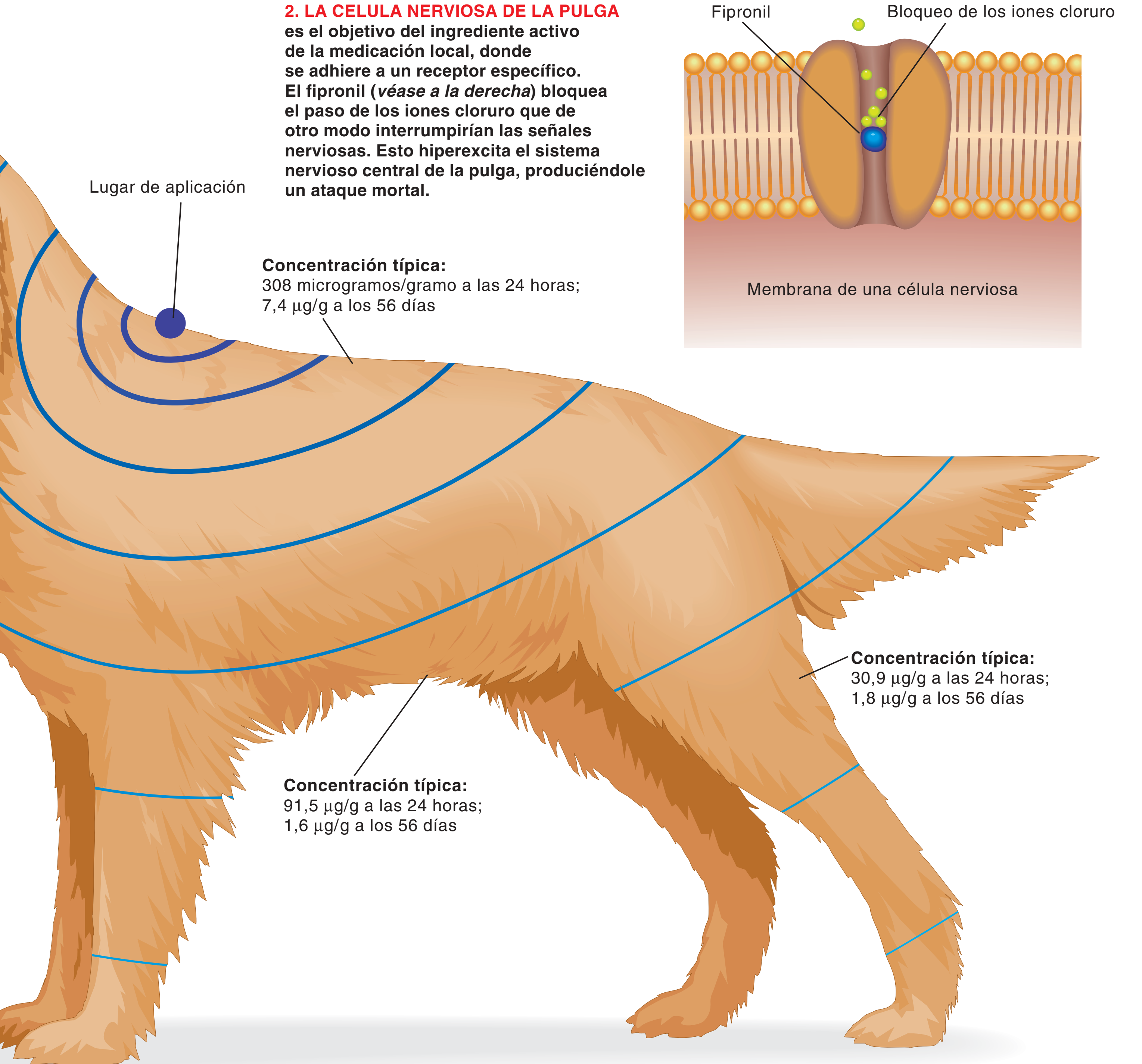
3. EL INSECTICIDA (*azul*) se almacena en las glándulas sebáceas del pelo, las cuales pueden segregar esa sustancia durante un mes o más.

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **NO MAS DAP:** Una pulga, al picar, deja saliva en la piel. Los animales pueden presentar una reacción alérgica que causa enrojecimiento y picor intenso. Al rascarse, pueden desarrollar una dermatitis alérgica a las pulgas. Durante años, la DAP fue el principal problema dermatológico de perros y gatos, pero los tratamientos "directos", por su rápida eficacia, han reducido espectacularmente la incidencia de ese trastorno.

➤ **MUERTE NEGRA:** Las pulgas de las ratas transportan unas bacterias que pueden desencadenar pestes, como la bubónica que aniquiló un tercio de la población europea en el siglo XIV. En 1999 los microbiólogos identificaron una peste en las ardillas, comunes y listadas, y otros roedores infestados de pulgas en 22 condados de los alrededores de Sacramento (California).

➤ **EL HOMBRE ANTES QUE LA BESTIA:** Los franceses fundaron en Lyon, en 1762, la primera escuela de veterinaria del mundo. En un comienzo la ciencia veterinaria se orientó no tanto hacia el remedio de los animales cuanto a un mejor conocimiento de las enfermedades zoonóticas para impedir su transmisión a los humanos.



2. LA CELULA NERVIOSA DE LA PULGA es el objetivo del ingrediente activo de la medicación local, donde se adhiere a un receptor específico. El fipronil (*véase a la derecha*) bloquea el paso de los iones cloruro que de otro modo interrumpirían las señales nerviosas. Esto hiperexcita el sistema nervioso central de la pulga, produciéndole un ataque mortal.

NEXOS

James Burke

Que empiece el espectáculo

A pesar de que he pasado la mayor parte de mi vida adulta trabajando para la pequeña pantalla, lo que realmente me emociona es ese momento mágico del cine en que se apagan las luces y aparecen imágenes en formato gigante y envolvente sonido estéreo. Me ocurre incluso en sesiones infantiles. Como el otro día, que tuve que llevar a un grupo de niños a una película de Disney. Mientras atendía a la proyección, no pude dejar de maldecir para mis adentros los destrozos que Hollywood comete con los guiones. Apenas si dejan traslucir la realidad.

Me refiero a los cuentos de los hermanos Grimm, tan explotados por Disney, que nunca fueron las almibaradas historias con las que hemos crecido. De hecho, en su versión original, a las hermanas de Cenicienta les arrancaron los ojos, Blancanieves se quedó embarazada y el Lobo Feroz se comió a la abuelita y a Caperucita Roja. Cierto es que el propio editor de los hermanos Grimm suavizó las historias para la segunda versión.

Los Grimm encontraron materia prima muy cruda en los cuentos populares germánicos que habían recogido para sus historias. Sobre 1806 empezaron a poner por escrito las fábulas que corrían entre pastores, muleros, buhoneros, gitanos y labriegos. Durante años, prestaron oídos a lo que consideraban ecos de la vieja patria: leyendas repletas de violencia, crueldad, racismo, desprecio hacia los extranjeros y despotismo. Material que, casi un siglo más tarde, enardecería los corazones de los nazis.

Los Grimm fueron parte de esa gran locura del renacimiento de la prehistoria que arrasó con la Europa romántica a principios del siglo XIX. Esta exaltación de lo popular se inspiró en la nueva ciencia de la lingüística y en el trabajo de un jurista galés en Calcuta. Sir William Jones se vio en la tesitura de aplicar la legislación británica en la colonia hindú. Para ello se enfrascó en el estudio de la cultura de la India y durante el curso de sus investigaciones topó con el sánscrito, asombroso y milenario lenguaje. Sus palabras eran tan parecidas a otras equivalentes en griego y latín (y germánico y persa y celta e incluso armenio y albanés) que Jones sospechó que el sánscrito debía de ser la lengua materna de casi todo el mundo.

Los alemanes se alegraron sobremanera del hallazgo, porque su existencia sugería que las razas teutónicas podrían tener una herencia cultural que se extendía en el pasado tanto como la francesa (téngase en cuenta que, por esa época, durante las guerras napoleónicas, los franceses estaban arrasando Alemania).

La euforia indo-europea desatada por el descubrimiento del sánscrito, afectó incluso a personas respetables. Así, al matemático Carl Gauss, compañero de los Grimm en la Universidad de Göttingen. Las teorías de Gauss tenían mucho peso por su reputación de genio. Se había ganado la cátedra en Göttingen en plena juventud: en 1794, con sólo diecisiete años, desarrolló un truco para calcular una órbita planetaria, aun cuando sólo se hubieran echado tres vistazos.

Que es más o menos como se descubrió el primer asteroide, Ceres. En 1801 Giuseppe Piazzi, astrónomo italiano, situó el nuevo cuerpo celeste, pero sólo lo pudo seguir nueve grados de su órbita antes de caer enfermo. Cuando Piazzi mejoró, empeoró el tiempo. Así que cuando el cielo de Palermo estuvo lo bastante despejado como para permitir a Piazzi volver a observarlo, Ceres había desaparecido. El descubrimiento de un nuevo cuerpo en el firmamento había provocado una excitación generalizada en Europa, que se acentuó con la pérdida del mismo. Sin embargo, no todo fue tristeza y desgracia. Merced a las matemáticas creativas de Gauss (oficialmente, el método de mínimos cuadrados), un año más tarde Ceres se hizo presente en el punto exacto donde las cifras de Gauss habían predicho. Tamaña proeza convirtió a Gauss en una celebridad, con astronómicas ofertas de trabajo de todas partes, de las cuales escogió la de Göttingen.

Uno de los admiradores de Gauss se hallaba tan impresionado con el asunto, que no se sintió capaz de poner su propio nombre al nuevo elemento que acababa de descubrir. El tipo en cuestión era un fornido, mujeriego e hipocondríaco sibarita sueco, que obtuvo un título nobiliario a cambio de impartir lecciones de química a la realeza. El barón Jöns Jakob Berzelius, viajero incansable y autor de guías, conocía a todo aquel que valía la pena conocer. La próxima vez que el lector sacie su sed con un vaso de H_2O, no olvide brindar por Berzelius, inventor de la simbología química moderna.

El gran Berzelius también era el mayor experto en Europa con el soplete, un instrumento que parece compuesto por un conjunto de fuelles, que utilizaba para alcanzar temperaturas de llama de 1500 grados Celsius. A estas temperaturas las sustancias se vuelven incandescentes y brillan de una forma característica que revela sus elementos componentes. Berzelius analizaba todo tipo de especies minerales para Goethe y otros personajes de su tiempo. (Amén de inspeccionar meteoritos, un mortero del antiguo Egipto y el jugo gástrico de un trampero canadiense.) En 1803 nadie le discutía su capacidad para examinar una piedra extraña, identificar el

nuevo elemento que se ha mencionado antes y, en homenaje a Gauss, denominarlo “cerio” en lugar de “berzelio”.

Una de los atractivos de explorar la trama de los cambios históricos reside en encontrar nexos como el siguiente. Nos encontramos en el norte de Escandinavia, contemplando a este gigante refinado a punto de brindarnos un nuevo beneficio, gracias a la actividad de alguien que, a miles de kilómetros, probablemente nunca había oído hablar de él. Me refiero al fecundo inventor y mejor apologeta de sí mismo, Thomas Alva Edison, y a sus dos brillantes contribuciones a la historia: la creación de la bombilla incandescente (de forma deliberada) y los efectos que tuvo (de forma accidental).

En 1882 la apertura de la estación eléctrica de Edison en la neoyorquina Pearl Street debió iluminar incluso a los inversores más estúpidos. Había que desprenderse de las acciones de las compañías de lámparas de gas, que ya estaban por los suelos. De pronto otro aristócrata en potencia irrumpió en escena, armado con una solución rutilante para las compañías de gas, gracias a Berzelius y a su piedra misteriosa.

El vienés Carl Auer von Welsbach descubrió que, al impregnar una gasa de algodón de Islandia con los minerales adecuados, de los cuales el uno por ciento era nitrato de cerio, y colocarla alrededor de una llama de gas, el cerio brillaba hasta septuplicar la luz despedida por la llama. Este invento de 1885, conocido como el manguito de Welsbach, le proporcionó un título nobiliario austrohúngaro y el derecho a escoger una previsible divisa para su linaje: “Más Luz”.

El nuevo dispositivo permitió mantener el negocio del alumbrado de gas en un negocio próspero hasta la Primera Guerra Mundial. Alrededor de 1900, en una pensión, un tipo con un nombre de actor de Hollywood, Lee De Forest, estaba buscando una lámpara de Welsbach cuando se le ocurrió la idea de un detector de llama. Imaginó un artilugio que recogería las variaciones en la carga de una gasa metálica (electrificada), por cuanto la corriente de la gasa estaba condicionada por la presencia de una llama. A Forest le interesaba cómo hacer perceptibles las sutiles variaciones de corriente. La clave podía estar en un fenómeno extraño con el que Edison se había encontrado inesperadamente: el filamento de su bombilla desprendía partículas que ensuciaban la base metálica de la bombilla.

Este fenómeno —denominado por Edison como el efecto Edison, que patentó, archivó y olvidó— resultó deberse al flujo constante de electrones que libera el filamento y se precipita hacia la base. De Forest colocó una gasa metálica entre el filamento y la base; utilizó entonces el poderoso flujo de electrones (el ahora tan práctico efecto Edison) para ampliar las pequeñas fluctuaciones de carga en la gasa metálica. Denominó audion a este amplificador de señales eléctricas para cualquier fin. Resultó fantástico para los detectores de llama. E incluso mejor para los amplificadores de teléfono. En 1914 se abría la primera línea telefónica entre Nueva York y San Francisco, toda ella con sonido amplificado.

Y ahora un gramo de ironía. Una de las muchas cosas inteligentes que el barón Berzelius había hecho cien años antes con su soplete fue aislar otro elemento. Lo denominó selenio. Demostró ser útil para los circuitos eléctricos. Cierto día de 1873 un operador de la terminal de telégrafos transatlántica de la isla irlandesa de May se percató de que la corriente variaba de forma extraña en sus resistencias de selenio: alta con luz solar, baja en oscuridad. El selenio emitía electricidad en respuesta a la luz.

Desde 1900 el catedrático Joseph T. Tykociner, de la Universidad de Illinois, trabajaba en el desarrollo de un grabador de voz hecho de selenio. Dirigió un haz de luz (cuya intensidad variaba en función de la intensidad de las vibraciones emitidas por la membrana de un micrófono) a través de una cinta virgen para imprimir las huellas de diversas exposiciones. Estas a su vez permitirían la entrada de cantidades variables de luz en la cinta y activar una célula de selenio, que en respuesta emitía corriente variable que recreaba el sonido original en un altavoz. Todo ello resultaba fantástico, si no fuera porque la señal era demasiado débil.

Entonces, voilà, en 1923 el nuevo sistema Movietone de la Western Electric incorporó el poder amplificador del audion. Y de pronto las películas se convirtieron en sonoras. Así pude escuchar cada palabra del cuento de los Grimm en esa película de Disney.

LIBROS

Tiempo

Historia, ciencia y filosofía

THE UNIVERSE UNVEILED. INSTRUMENTS AND IMAGES THROUGH HISTORY, por Bruce Stephenson, Marvin Bolt y Anna Felicity Friedman. Cambridge University Press-The Adler Planetarium and Astronomy Museum; 2000. **DIE GESCHICHTE DER STUNDE. UHREN UND MODERNE ZEITORDNUNGEN,** por Gerhard Dohrn-van Rossum. Carl Hanser Verlag; Munich, 1992. **TIME MATTERS. TIME, CREATION, AND COSMOLOGY IN MEDIEVAL JEWISH PHILOSOPHY,** por T. M. Rudavsky. State University of New York Press; Albany, 2000.

GENESIS OF THE BIG BANG, por Ralph A. Alpher y Robert Herman. Oxford University Press; Oxford, 2001. **A DIFFERENT APPROACH TO COSMOLOGY. FROM A STATIC UNIVERSE THROUGHT THE BIG BANG TOWARDS REALITY,** por Fred Hoyle, Geofrey Burbidge y Jayant V. Narlikar. Cambridge University Press; Cambridge, 2000. **KAON PHYSICS.** Dirigido por Jonathan L. Rosner y Bruce D. Winstein. The University of Chicago Press; Chicago, 2001.

THE PHYSICAL BASIS OF THE DIRECTION OF TIME, por H. Dieter Zeh. Springer; Heidelberg, 1999. **UNIFYING SCIENTIFIC THEORIES. PHYSICAL CONCEPTS AND MATHEMATICAL STRUCTURES,** por Margaret Morrison. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.

Leyes físicas y sistemas filosóficos rivalizan por elevar a un puesto excelso el concepto de tiempo. Raro es el mes en que no aparecen nuevos libros sobre su decurso o dirección, desde que Stephen Hawking abrió brecha con su *Brief History of Time*. Pese a ese torrente de letra impresa, seguimos sin aprehender su naturaleza.

Aunque la percepción de los ritmos circadianos y estacionales sea muy anterior a la aparición del hombre, éste tuvo pronta conciencia del sucederse del día y la noche, del paso de las estaciones y, en última instancia, del pasado y futuro de su vida como una suerte de trayectoria lineal. En la cuantificación de esos ritmos encontramos una de las primeras manifestaciones culturales de la historia (*The Universe Unveiled*).

Cada día el Sol salía por el este y cruzaba el cielo para ponerse en el oeste. A mediodía se hallaba en el punto más alto del firmamento. En su avance hacia el oeste, las sombras se arrastran sobre el suelo en dirección este. Nuestros antepasados aprenderían a acompasar el momento del día con el progreso de esas sombras. Los ciclos lunares, y su trayectoria a través de las constelaciones del zodiaco, marcan los meses. Los cambios de estación, asociados a ciclos celestes, dividían el año. Los puntos de orto y ocaso solares se desplazaban hacia el norte en primavera y verano, y hacia el sur en otoño e invierno. Acompasando a las estaciones, aparecen distintas estrellas.

El reloj solar indica la hora del día marcando la posición de la sombra arrojada por un puntero, o gnomon. Los modelos de uso permanente, que funcionaban sólo en una latitud determinada, se instalaban en los jardines y en las torres de las iglesias. Los horizontales portátiles podían calibrarse para utilizarlos en diferentes ciudades e incluían una brújula para alinearse con el norte. Además de la hora, algunos relojes solares incluían un reajuste para la fecha.

El nocturnario sigue el movimiento de ciertas estrellas preseleccionadas. En ese instrumento, el firmamento opera como la cara de un reloj, con la estrella Polar en el centro y otra estrella en su manecilla horaria. Mediante estas coordenadas, el nocturnario señala la hora de la noche con una precisión de 15 minutos.

El astrolabio oriental constituye el más avanzado de los instrumentos medidores del tiempo anteriores a los relojes mecánicos. Consta de un disco móvil, la rete, que representa los cielos en su evolución; los punteros de la rete señalan las estrellas brillantes. En un anillo se dispone el zodiaco. Una placa, o tímpano, porta inscritas las coordenadas de altitud y azimuth para una determinada latitud. Puesto que la posición de la rete indica el estado del firmamento en su rotación diaria, el astrolabio actúa como un reloj natural de 24 horas. El astrolabio occidental suele presentar dos escalas, una para el calendario y la otra para la eclíptica. Matemáticos y hábiles artesanos comprimieron buena parte de la función del astrolabio en instrumentos menores y menos caros: los cuadrantes de astrolabio.

La organización del tiempo con la introducción del reloj mecánico (*Die Geschichte der Stunde. Uhren und moderne Zeitordnungen*) trajo consigo una profunda revolución en la sociedad europea, hasta el punto de ejemplificar el puente de tránsito hacia la modernidad. Frente a los estereotipos en torno al papel de los mercaderes, Gerhard Dohrn-van Rossum subraya el impulso del príncipe en la instalación de relojes para marcar el curso de la vida urbana, sin pasar por alto otros aspectos de carácter técnico, como la historia oscura del escape, o mecanismo regulador.

Para un autor del primer tercio del siglo XV, punto de arranque de la obra, su época era testigo de grandes innovaciones. Al par que condenaba la astrología, recordaba que Dios había creado el firmamento a la manera de un reloj cabal. La luz y el tiempo, con los cielos estrellados, estaban destinados al servicio del hombre, no a su determinista esclavización. Y así como los cuerpos celestes no regulaban el quehacer del hombre, tampoco el reloj mecánico lo sometía. Eran los hombres los que organizaban su actividad mediante

tan novedoso referente. La incardinación social del tiempo y su medición se hizo cada vez más firme hasta alcanzar un punto álgido en la revolución industrial, cuando la producción se pautó en un horario.

Tiempo y cosmología han ido de la mano en el pensamiento occidental. También en la Edad Media (*Time Matters*), cuyo desarrollo traza T. M. Rudavsky a través de los escritos de Ibn Gabirol, Maimónides, Gersónides y Crescas. Lo mismo que la islámica y la cristiana, la filosofía judía medieval bebe en fuentes griegas y helenísticas, con el añadido obvio de la tradición rabínica. Para responder a las cuestiones cruciales en torno a la finitud o infinitud del tiempo, su dependencia de la creación o anterioridad a la misma y otros temas de tenor similar, los autores se dividirán en dos frentes, fundados ambos en la Biblia: los partidarios de una visión lineal del tiempo, de acuerdo con la cual la historia constituye una secuencia irreversible de hechos irrepetibles, y los que propugnan un tiempo circular de ciclos que se iteran. Coinciden en que a Dios le pertenece en exclusiva el atributo de la eternidad.

Fuera de la Biblia el concepto de eternidad, puesto en juego por Parménides y desarrollado por Platón en el *Timeo*, recibe en Aristóteles una sistematización rigurosa. Platón intentó superar el debate de los eleatas sobre lo uno y lo múltiple, el ser y el devenir, con la distinción entre eternidad (*ainios*) y perdurabilidad (*aidios*). Sólo el dominio de las formas es eterno; nuestro mundo, obra del demiurgo, es, en el mejor de los casos, perdurable, por cuanto está vinculado al movimiento. Y como el número del movimiento define Aristóteles el tiempo.

Con esos mimbres, y bastante influencia neoplatónica posterior, tejen los filósofos hebreos su teoría de la temporalidad. A propósito de la eternidad del mundo defendida por Aristóteles, Maimónides, seguidor suyo fidelísimo, le excusará aduciendo que se trata de una mera hipótesis de probabilidad, no de una demostración apodíctica. Aunque el tiempo es medida del movimiento, prosigue, primero fue creado aquél y luego las cosas móviles. Gersónides insistirá en la finitud del tiempo y del movimiento. El tiempo cae en la categoría de cantidad continua. Medido por convención, no por naturaleza, el tiempo es parcialmente potencial y parcialmente actual. El carácter potencial mira al futuro. Crescas y Albo se desvían de la descripción aristotélica; si aquél resalta la discontinuidad entre tiempo y movimiento, éste apela a la subjetividad del tiempo.

Cuando Galileo descubrió que un péndulo de una longitud determinada tardaba siempre el mismo tiempo en completar una oscilación, el nuevo reloj mecánico redobló la precisión de la medida. (Las horas se dividieron en minutos, y éstos en segundos.) Con sus leyes del movimiento, Isaac Newton puso el tiempo en sus límites físicos. Entidad separada del espacio, el tiempo era absoluto, matemático y carente de reposo; fluía a una razón constante como si hubiera un imaginario reloj cósmico que marcara los segundos, horas y años. Kant lo convirtió en intuición innata.

Nocturnario de 1589. Autor desconocido

En la concepción einsteiniana del universo, basada en la geometría de H. Minkowski, el espacio y el tiempo aparecen entreverados, constituyendo una cuarta dimensión. El desarrollo de la teoría de la relatividad y de la mecánica cuántica ha conducido al modelo actual de universo y la función del tiempo en el mismo: la gran explosión inicial (*Genesis of the Big Bang*). En un ensayo de rara claridad, Ralph A. Alpher y Robert Herman, padres o al menos parteros de la criatura, desbrozan la elaboración, confirmación observacional, tesis alternativas y futuro del universo según las leyes de la teoría de la gran explosión. Si Alpher, con George Gamow, adelantó la hipótesis de la expansión del universo a partir de la materia primigenia, Herman planteó la posible existencia de la radiación residual de fondo, corroborada 17 años después, en 1965, por Arno A. Penzias y Robert W. Wilson. Con anterioridad se había demostrado la necesidad de un estadio primitivo extremadamente caliente y denso en un universo en expansión que justificara las concentraciones cósmicas de deuterio, helio y litio y su relación al hidrógeno.

La cosmología física se ocupa del *cómo* del universo y no del *por qué*. Por universo se entiende el conjunto de partículas elementales, átomos, iones, cuerpos planetarios, radiación electromagnética en todas las longitudes de onda, los neutrinos, gas, polvo, estrellas, conjuntos de estrellas, galaxias, cúmulos y supercúmulos. Existe también un componente misterioso en una cantidad todavía sin determinar, la materia obscura. Buena parte del gas se encuentra en el estado de plasma neutro. Consta de iones dotados de carga positiva —es decir, núcleos atómicos desprovistos de algunos, si no de todos sus electrones— y

electrones dotados de carga negativa libres, cuya suma total de cargas positivas y negativas en un volumen significativo del espacio es cero, de acuerdo con un principio aceptado de conservación de la carga. El cosmos es, en conjunto, eléctricamente neutro.

La teoría de la relatividad especial de Einstein postula que la velocidad de la luz es finita y constante, cifrada en 3×10^{10} centímetros por segundo. Si hubiéramos de observar un cuerpo celeste a una distancia de 10.000 millones de años luz, los veríamos por la luz emitida hace 10.000 millones de años, cuando era mucho más joven, menos evolucionado, quizá de una apariencia completamente distinta y más próximo a sus cuerpos vecinos. La determinación real de la edad, a partir de la distancia medida a un objeto, dependerá del tipo de universo escogido; salvo para los objetos cercanos, la edad atribuida variará según consideremos el universo abierto, cerrado o plano. Las observaciones acopladas a la teoría de la relatividad especial indican que el universo es homogéneo (el mismo en cualquier parte) e isotrópico (sus propiedades son las mismas en todas las direcciones) a gran escala.



Mapa astronómico con el sistema copernicano, del Atlas colestis *(Nuremberg, 1742)*

La palabra "explosión" (*bang*) para el origen del universo apareció en un libro de 1928 escrito por Arthur S. Eddington, *The Nature of Physical Universe*; así pues, mucho antes de la articulación del modelo actual. Por entonces, le preocupaban sólo dos posibilidades: la de un universo eterno y la de un universo con un principio de existencia. "No creo que el presente estado de cosas comenzara con un trueno", decía. La expresión "gran explosión" se atribuye, paradójicamente a Fred Hoyle, el más acérrimo opositor a la teoría (*A Different Approach to Cosmology. From a Static Universe throught the Big Bang towards Reality*).

Hoyle, Herman Bondi y Thomas Gold iniciaron un rumbo contracorriente cuando propusieron el modelo del estado estacionario. Aceptaban la uniformidad de la naturaleza y las pruebas de un universo en expansión. La homogeneidad e isotropía no sólo de la distribución espacial, sino también temporal, de materia y energía constituían para ellos el principio cosmológico perfecto. En virtud del mismo, el universo era y seguiría siendo, en promedio, tal como lo conocemos, aunque no se descartaba una evolución cosmológica a escala local.

Para justificar la expansión del universo, que parece exigir la dilución continua de materia y energía, Hoyle y J. V. Narlikar propusieron la idea de un campo c (un campo de creación) que empaparía el universo y actuaría como fuente de materia y energía. Sin embargo, el ritmo propuesto de aparición de nueva materia no alcanza el umbral de observabilidad. Pese a su navegación solitaria, la tesis del modelo estacionario cuenta con un sólido apoyo de pruebas extragalácticas.

Por las mismas fechas en que se pergeñaban ambas teorías cosmológicas, el grupo de C. F. Powell descubría en los rayos cósmicos el mesón de fuerza nuclear conocido hoy por pion, con una masa de unos 140 MeV. Tal éxito espoleó a los físicos a pensar en la posibilidad de que hubiera otros mesones, de masa superior. Se propusieron dos candidatos, el mesón V^0 y el V^+. No tardó en verse que todos los investigadores en rayos cósmicos estaban observando, midiendo e identificando las mismas entidades. Se adoptó para las nuevas partículas con masas en torno a los 500 MeV el nombre genérico de mesón K (*Kaon Physics*).

La desintegración de los kaones constituía un elemento clave en el reconocimiento de que las interacciones débiles no conservaban la paridad (P), o simetría especular. Eso ocurría en 1957. A la caída de la invariancia de P se sumó el reconocimiento de que la conjugación de carga (C) tampoco se mantenía en tales procesos. A mediados de los años sesenta se demostró la violación de la simetría CP.

El teorema CPT (donde T designa la inversión del tiempo), que se basa en principios generales de las teorías cuánticas de campos, establece que cualquier orden del producto triple de las simetrías discretas C, P y T representa una simetría exacta. El teorema predice que las partículas y antipartículas tienen iguales la masa, la vida media, la razón de carga a masa y la razón giromagnética. La simetría CPT se ha comprobado en numerosos experimentos y permanece todavía como la única combinación de C, P y T que observa una simetría exacta en la naturaleza. La fenomenología del sistema del kaón neutro nos enseña que la violación CP debe ir acompañada o bien de la violación de la inversión del tiempo o bien por la violación CPT o por ambas simultáneamente. Hace poco se obtuvieron las primeras pruebas de la no invariancia de la inversión del tiempo.

Alcanzados esos niveles de lucubración, la física del tiempo plantea nuevos interrogantes a la filosofía. En realidad, física y filosofía no han dejado de interrelacionarse en el pensamiento contemporáneo (*Unifying Scientific Theories* y *The Physical Basis of the Direction of Time*). Margaret Morrison dedica, en su búsqueda epistemológica de

la unificación de teorías, un extenso apartado al tiempo einsteiniano. Recuerda así que, eliminado el éter como marco de reposo absoluto, la interpretación del tiempo local se convirtió en la clave para solucionar problemas electrodinámicos. En efecto, Lorentz admitía dos tiempos "reales", definido uno en relación con el éter y el otro en relación con un marco móvil. Lorentz pretendía reducir la dinámica a la electrodinámica, transformar problemas relativos a los cuerpos en movimiento a problemas de cuerpos en reposo.

Pero el postulado de relatividad de Einstein hizo a la velocidad de *c* independiente del marco de referencia. Puesto que la teoría de la relatividad especial no precisaba la mecánica del éter, quedaba superado el dualismo de Lorentz. La conjunción del principio de relatividad con la constancia de la velocidad de la luz conducía a una nueva concepción del tiempo, que a su vez aportaba el fundamento para las ecuaciones de transformación. En vez de deducir las ecuaciones de transformación para problemas específicos, como había hecho Lorentz, la estrategia de Einstein consistió en plantearse la transformación de sistemas físicos de suerte que pudieran eliminarse las asimetrías en electrodinámica, un problema éste de los cuerpos móviles.

Al abordar la relatividad de longitudes y tiempos, Einstein comienza por dar una definición de simultaneidad. No era fácil acotar esa noción. La definición einsteiniana de simultaneidad se centra en la sincronización de dos relojes en diferentes lugares. Viene dada en términos de propagación de rayos luminosos: Si un rayo luminoso es emitido desde el punto P en el tiempo t, se refleja en Q en el tiempo t' y vuelve a P en el tiempo t'', se dice entonces que el reloj en Q está sincronizado con



Reloj analemmático de Thomas Tuttell (Londres c.1700)

Solitones

THE VERSATIL SOLITON, por Alexandre T. Filippov. Birkhäuser; Basilea, 2000.

El texto de Filippov es notable. Contiene una equilibrada dosis de descripción de los ambientes científicos de los últimos siglos en los que se han desarrollado los conceptos relacionados con los solitones. Expone los grandes rasgos vitales de algunos de los protagonistas directos o indirectos más prominentes, tanto del mundo occidental como del entorno de la ex-Unión Soviética, que el autor conoce bien; y, lo más importante de todo, se trata de un buen texto introductorio de la teoría de los solitones.

Los actuales planes de estudio de la física siguen, como es bastante natural, basados en la física lineal. Su conocimiento es fundamental para la formación de los científicos y es la más fácilmente sistematizable. La causa es, en parte, que sólo tenemos métodos matemáticos generales para resolver las principales ecuaciones de la física lineal. Tanto las leyes de Newton en que se basa la mecánica, como las ecuaciones de Maxwell que rigen los fenómenos electromagnéticos, como las ecuaciones de ondas y la ecuación de Schrödinger que rige la mecánica cuántica, son ecuaciones diferenciales lineales, cuya teoría general es bien conocida. Por el contrario, las ecuaciones no lineales, como las que describen los solitones, carecen de tanta sistematización, lo que, junto a su relativa novedad, ha dificultado su presencia en los cursos fundamentales de licenciatura.

Sin embargo, los progresos que se han realizado en el conocimiento de los solitones desde su primera y famosa observación por John Scott Russell en 1834 y su descripción en muchos otros campos, como la teoría de los vórtices o los pulsos nerviosos que ya estudió Helmholtz a mediados del siglo XIX, y, sobre todo, una cierta sistematización de su estudio en los últimos decenios, apuntan a que ya sería hora de que los estudiantes de cursos de física se adentraran en los fenómenos no lineales, para lo que la obra que comentamos podría ser un texto bueno y accesible.

Entre otras muchas cosas, en este libro se aprende que el nombre solitón, como es normal, no fue acuñado por su descubridor. No fue hasta 1965 cuando Zabusky y Kruskal propusieron el término "solitrón", cometiendo el mismo error que cuando se denominaron "mesotrones" a los recién descubiertos mesones, los intermediarios de las fuerzas nucleares, los piones, predichos por Yukawa y encontrados por Powell en 1947 en la radiación cósmica. Entonces fue Heisenberg quien, gracias a sus conocimientos de griego advirtió que "ente", en griego, es "on", sufijo que ya se usaba para designar a las partículas elementales, y que el propuesto nombre de mesotrón debía cambiarse por el de mesón. En este caso, el papel de Heisenberg lo hizo una compañía que tenía registrado el nombre para uno de sus productos, con lo cual se optó por el más correcto nombre de "solitón".

el reloj en P si $t' = (t + t'')/2$. Podemos, pues, definir un tiempo común para P y Q mediante la ecuación $t' - t = t'' - t'$, lo que significa que la velocidad de la luz que viaja hacia atrás de Q a P es igual a la velocidad de la luz que viaja de P a Q.

Con la definición de los relojes síncronos, Einstein da por supuesto que ha descrito la simultaneidad y la idea de tiempo. "El tiempo de un acontecimiento es lo que se da simultáneamente con el acontecimiento por un reloj estacionario situado en el lugar del acontecimiento, siendo síncrono este reloj… con un reloj estacionario especificado". Si en la teoría de Lorentz había un tiempo físico y otro matemático, en la teoría de la relatividad especial habrá tantos tiempos cuantos marcos de referencia. El tiempo local, que tiene sólo significación matemática en las ecuaciones de transformación de Lorentz, se convierte en real o tiempo físico para Einstein.

La obra de Zeh sobre la flecha del tiempo, que va por la tercera edición, es ya un texto clásico sobre la reversibilidad y la asimetría y promete serlo sobre la decoherencia y la atemporalidad. La asimetría de la naturaleza bajo una "inversión del tiempo" (es decir, una vuelta atrás del movimiento y el cambio) se nos ofrece como una característica ínsita en nuestro mundo. Si compete a la física justificar que sus leyes controlan todo lo que sucede en la naturaleza, debiera poder explicar esta asimetría fundamental de la dirección del tiempo. No acontece así. Las leyes de la naturaleza son esencialmente simétricas bajo inversión del tiempo.

Desde Eddington se denominan flechas del tiempo a las clases generales de fenómenos que caracterizan una dirección. Podemos reducir a seis las principales. En primer lugar, la radiación. Los campos que interaccionan con fuentes locales reciben una descripción apropiada a través de soluciones de retardo; por ejemplo, se observa una onda esférica tras un episodio de fuente puntual, que se propaga hacia el exterior.

Mayor partido se le ha sacado a la flecha termodinámica del tiempo.

Física y química de la atmósfera

An Introduction to Atmospheric Physics, por David G. Andrews. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.
Introduction to Atmospheric Chemistry, por Peter C. Hobbs. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.

La gestión de los recursos naturales, cuestión de gran trascendencia social, reclama con frecuencia una respuesta científica y desapasionada. Muchas universidades ofrecen hoy titulaciones relativas al medio ambiente, con un enfoque acertadamente pluridisciplinar. ¿Cómo conjugar una formación que, sin descuidar lo esencial, sea accesible a estudiantes de muy distinta procedencia y con trasfondo dispar? Lo mismo vale para quien por su cuenta desee adquirir algunas nociones fundamentales. ¿Qué propuesta se le ofrece al que se acerca a este tema desde otros ámbitos?

En lo que atañe a la física y la química de la atmósfera, estos dos volúmenes brindan una magnífica respuesta. Para empezar, la complejidad matemática está reducida al mínimo. Hay escollos que no se pueden soslayar: por ejemplo, las ecuaciones diferenciales vectoriales de la mecánica de fluidos. Pero en esos casos el ritmo es más pausado y se explica el álgebra con todo lujo de detalles. De manera que con los conocimientos de física, química y cálculo adquiridos en el primer curso de cualquier carrera científica se puede abordar la lectura.

La concisión y brevedad de ambas obras permiten proponerlas como bibliografía de una asignatura semestral, considerando que la exposición cubre ampliamente las expectativas de un curso introductorio. En el tomo de Andrews, la termodinámica y la mecánica de fluidos adquieren, lógicamente, mayor relieve. En el de Hobbs, se resaltan sobre todo los ciclos de las especies químicas en la atmósfera: fuentes, transporte, transformaciones, sumideros. En ambos se analiza el transporte de calor por radiación, así como su interacción con los gases de la atmósfera. Y en uno y otro se proponen modelos simples para fenómenos complejos, como el efecto invernadero o el agujero de la capa de ozono, que ayudan a comprender lo esencial. "*An Introduction to Atmospheric Physics*" es un ejemplo de elegancia en este aspecto.

Por su carácter de guía en la toma de contacto con el estudio cuantitativo de la atmósfera, se centran en los fenómenos globales, o al menos a gran escala. Así, se describen los procesos que desencadenan la lluvia, pero las complejidades de la meteorología y la predicción del tiempo quedan fuera del alcance de estas obras. De este enfoque general, sin embargo, resulta una carencia: no se tratan algunos problemas locales de gran interés, como puede ser el penacho de una chimenea y la difusión de contaminantes a pequeña escala. Carencia que en *Introduction to Atmospheric Chemistry* está paliada con una gran cantidad de problemas resueltos que sí que abordan aspectos particulares. (En el otro texto también se dan enunciados y soluciones de problemas).

Los dos libros se complementan muy bien. Física y química aparecen mezcladas y algunos temas se repiten, tratados con desigual profundidad. Aparte del hincapié en diferentes fenómenos, resulta instructivo dejarse llevar por el estilo particular de cada autor. Andrews parece más preocupado en obtener modelos cuantitativos simples, a costa de las simplificaciones que sean necesarias; y en consecuencia, rara vez considera la atmósfera como un sistema abierto: están casi ausentes las interacciones con los continentes y los océanos. En cambio, Hobbs pone de relieve esas interacciones, aunque se vea obligado a ceder a veces en lo tocante al rigor para quedarse en descripciones cualitativas.

—Angel Garcimartín

Aritmética comercial

EL ARTE DEL ALGUARISMO. Dirección y estudio de Betsabé Caunedo del Pozo y Ricardo Córdoba de la Llave. Junta de Castilla y León; Salamanca, 2000.

La edición de este *Libro de arismética que es dicho alguarismo* junto con el *Libro que enseña ensayar cualquier moneda* saca a la luz el primer tratado conocido hasta ahora de aritmética comercial y de ensayo de moneda redactado en la Corona de Castilla probablemente en la primera mitad del siglo XIV, aunque la copia manuscrita conservada, del siglo XVI, está fechada en 1393, pero es copia de un ejemplar o ejemplares anteriores. La primera noticia de la existencia en el fondo manuscrito de la Colegiata de San Isidoro de este manual de aritmética comercial se debe a Beaujouan, en 1973. La preparación de una ambiciosa historia de la ciencia y de la técnica en la Corona de Castilla, próxima a publicarse, ha propiciado la revisión y búsqueda de materiales en los ricos archivos y bibliotecas españolas, especialmente de los siglos bajomedievales, por ser éstos casi desconocidos en cuanto a la actividad científica y técnica.

La existencia de un comercio activo tanto atlántico como mediterráneo entre comerciantes castellanos y centroeuropeos, y hasta los nombres de importantes mercaderes, era conocida, pero no las fuentes donde aprendían y se difundían las técnicas comerciales que les servían de soporte. Entre los tratados de aritmética comercial bajomedievales, manuscritos o ya editados, en la Europa latina, no se cita ninguno perteneciente a la Corona de Castilla. Pero el contacto con el mundo italiano y la existencia de una tradición andalusí conducían a pensar en la existencia y circulación de este tipo de tratados. La primera aritmética comercial detectada en los reinos hispánicos era la *Summa de l'art d'Aritmètica* de Francesc Santcliment, que sigue siendo la primera impresa (Barcelona, 1482), que proporciona información relativa al entorno mercantil mediterráneo y de los demás reinos de la Corona de Aragón.

El riguroso y exhaustivo estudio realizado por Betsabé Caunedo y Ricardo Córdoba sitúa perfectamente este *Arte del alguarismo* en su contexto histórico; el análisis de su contenido y la comparación con los más importantes tratados europeos bajomedievales; les lleva a incluir este libro de aritmética dentro de una tradición de la que participaban los textos italianos coetáneos, en la línea del pionero *Liber Abacci* de Leonardo de Pisa, más conocido como Fibonacci, escrito en latín en 1202. Caunedo y Córdoba resaltan que la fecha temprana de su aparición no le resta calidad aritmética, ya que ni en la presentación de las operaciones ni en el enorme caudal de ejercicios prácticos desmerece al lado de todas las aritméticas comerciales bajo medievales, ocupando entre ellas un merecido lugar. El tratado —de autor desconocido, aunque de probable ascendencia judía, que no deja huella de su identidad ni de la localidad en la que lo elaboró— permite además que nos acerquemos a la terminología técnica medieval castellana. *El arte del alguarismo* es por tanto una obra muy importante en sí misma, por incluir también un manual técnico sobre la afinación de la plata y la fabricación de la moneda y por la influencia que pudo tener en obras de este tipo. —M.ª ISABEL VICENTE MAROTO

Aunque la segunda ley $dS/dt \geq 0$ se la supone una ley de la naturaleza, en su descripción microscópica debe considerarse un factum. Cuando de la evolución decimos que es una ciencia histórica, estamos aludiendo a otra flecha del tiempo. No exenta, empero de paradojas, pues aparenta contradecir la segunda ley de la termodinámica. Discrepancia que se resuelve, si tomamos en consideración la entropía del entorno.

La flecha de la medición cuantomecánica nos señala la interpretación de la probabilidad de la mecánica cuántica, entendida como un indeterminismo fundamental del futuro. Se trata el colapso de la función de onda que se produce durante el proceso de medición. En mecánica cuántica existe otra flecha del tiempo, la desintegración exponencial. Indica que los estados inestables (en particular las "resonancias" de las partículas elementales de la teoría cuántica) acostumbran desvanecerse exponencialmente con el tiempo de crecimiento. (El desarrollo exponencial se observa sólo en situaciones de auto-organización.)

Por último, la gravedad, que conduce a la aceleración de la contracción. En el caso de sistemas gravitatorios complejos (las galaxias), la contracción contra su presión interna está controlada por fenómenos termodinámicos y de radiación. Tales objetos gravitatorios se caracterizan por su capacidad térmica negativa, e incluso clásicamente por la capacidad de contraerse sin límite de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica. Para algunos físicos, la asimetría representada por esas seis flechas del tiempo, la termodinámica en particular, ocupa un lugar más fundamental que las propias leyes dinámicas.

Vinculadas con la flecha del tiempo, han adquirido cierta notoriedad las llamadas máquinas del tiempo. El viaje hacia el futuro no encierra en principio problema y su posibilidad es conocida; se trata de una predicción de la teoría einsteiniana. Harina de otro costal es volver hacia atrás. Un terreno sembrado de paradojas, como el del viajero en el tiempo que mata a su abuelo cuando era éste niño, negando en consecuencia su propia existencia. Absurdos aparte, se ha propuesto el modelo de agujero de gusano, es decir, una suerte de agujero negro con entrada y salida. Si existiera, podría proporcionar un atajo entre puntos distantes en el espacio. Mientras que caer en un agujero negro sería seguir un camino de sentido único hacia ninguna parte, el ingreso en un agujero de gusano podría permitirnos salir momentos más tarde en otra parte del universo. Se ha especulado también con las cuerdas cósmicas, unos tubos angostísimos de energía atrapada y abandonada desde la gran explosión, dotados de masa suficiente para doblar el espacio y el tiempo.

—LUIS ALONSO

Aventuras problemáticas

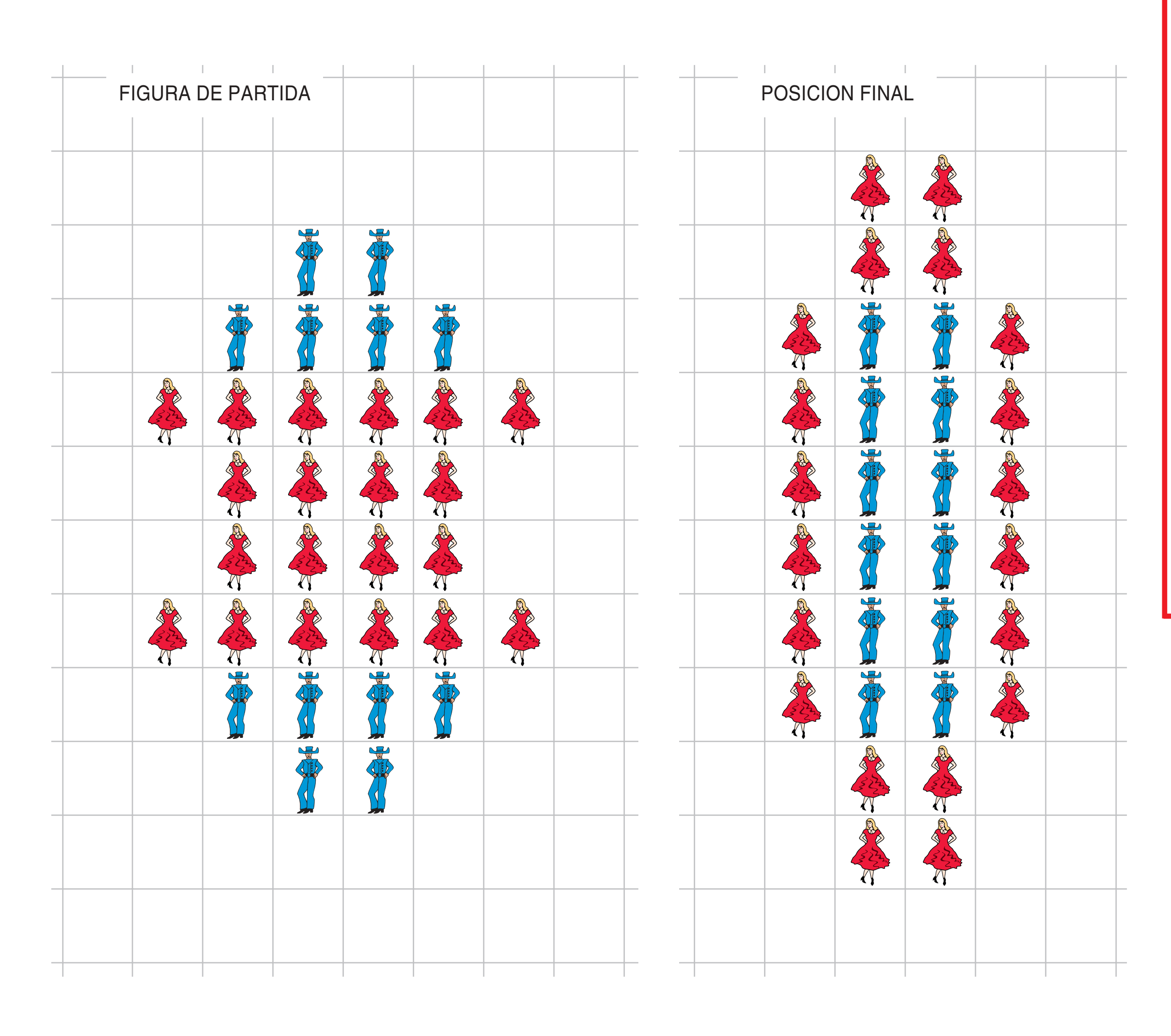
Dennis E. Shasha

Baile de cuadros

Pisando airosa, una capa blanca flameando a sus espaldas, la directora de una famosa compañía de danza entró en mi despacho. "Sabrá usted que ciertos escritores recurren a 'negros'. Yo necesito ahora un ayudante de coreografía." Le indiqué que tomara asiento y me expusiera los detalles de su problema.

El cuerpo de baile consta de 12 hombres y 20 mujeres (que en las ilustraciones aparecen en azul y en rojo, respectivamente). En un momento clave de la actuación, han de pasar desde una figura en la que los hombres rodean a las mujeres hasta otra en la que las mujeres rodean a los hombres. La transición se desarrolla en tres fases. Durante cada etapa, cada bailarín puede, o bien permanecer en su lugar, o bien dar un paso en una de cuatro direcciones: hacia la izquierda, hacia la derecha, al frente o hacia atrás. Hay, sin embargo, dos condiciones importantes: dos bailarines no pueden permutar sus posiciones en un paso; tampoco pueden ocupar el mismo espacio después de dar el paso. Los bailarines, por encima de todo, han de evitar las colisiones.

Vemos al pie las posiciones inicial y final de los bailarines. ¿Le será posible detallar los movimientos de cada paso, para llegar a la posición final sin infringir las condiciones? Puede ser práctico y representarlos en papel cuadriculado.



Solución del problema del mes pasado:

La solución del primer problema del oráculo no fiable es que la puesta inicial de 100 € se puede convertir en al menos 9309 € si se aplica la estrategia óptima de apuestas, que requiere efectuar una primera apuesta un poquito menor de 81,82 €. En el segundo problema, donde se han de efectuar todas las puestas por adelantado, la estrategia óptima sólo garantiza 1600 €.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



ANTICUERPOS MONOCLONALES, por Carol Ezzell

Diseñados para eliminar el cáncer y otras enfermedades, no lograron alcanzar el fin previsto. Las dificultades encontradas podrían subsanarse ahora con nuevos prototipos.

CODIGO ROJO PARA LA RED, por Carolyn Meinel

¿Podría ser hundida Internet? Los ataques recientes podrían ser presagio de guerras cibernéticas destructivas entre grupos vandálicos o incluso entre gobiernos.

AUTOPISTAS DE INFORMACION, por Steven Ashley

A través de Internet los conductores tienen acceso a partes de tráfico personalizados, mensajes verbales de correo electrónico y juegos de vídeo. Pero, ¿es seguro hacerlo?

LA FISICA EN EL ULTIMO CUARTO DEL SIGLO XX, por Xavier Roqué

¿Qué es lo más significativo que le ha sucedido a la física en los últimos 25 años? ¿Cuáles son las tendencias en la disciplina y los retos de futuro? ¿Cómo se ve este panorama desde nuestro país? El autor propone algunas respuestas sucintas a estas cuestiones.

EL HIELO DE LA VIDA, por David F. Blake y Peter Jenniskens

El hielo tal y como se presenta en la Tierra es hostil para la vida. Pero una forma exótica de hielo en el espacio puede, de hecho, facilitar la creación de moléculas orgánicas —y podría haber depositado las semillas de la vida en la Tierra.

REFUGIOS DE VIDA EN UN UNIVERSO HOSTIL, por Guillermo González, Donald Brownlee y Peter D. Ward

Sólo una parte de nuestra galaxia es apta para una forma de vida evolucionada.

DEGENERACION MACULAR, por Hui Sun y Jeremy Nathans

Se han iniciado investigaciones para identificar la causas de este devastador daño ocular que se presenta en la edad avanzada.

NUEVA ORLEANS SE HUNDE, por Mark Fischetti

La actividad humana a lo largo del Mississippi ha aumentado muchísimo el peligro de la urbe, que sólo puede salvarse con gigantescas obras de ingeniería que transformen el sudeste de Luisiana.

LUZ Y EVOLUCION VEGETAL, por Fernando Valladares

En el curso de la evolución unas plantas se han adaptado a una vida sometida a radiaciones extremas y otras han desarrollado una notable capacidad para acomodarse a la luz del momento.

